

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA

ANDRÉ LUIS STEFANELLO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICO-METALÚRGICA DO REVESTIMENTO DE LIGA
DE NÍQUEL INCONEL 625 POR GTAW NA FORMA DE MÚLTIPLAS CAMADAS
SOBRE AÇO CARBONO

CURITIBA

2017

ANDRÉ LUIS STEFANELLO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICO-METALÚRGICA DO REVESTIMENTO DE LIGA
DE NÍQUEL INCONEL 625 POR GTAW NA FORMA DE MÚLTIPLAS CAMADAS
SOBRE AÇO CARBONO

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica, no curso de mestrado em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Paraná,
Setor de Tecnologia, na área de concentração
Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Scheid

CURITIBA
2017

S816 Stefanello, André Luis

Caracterização Mecânico-Metalúrgica do Revestimento de Liga de Níquel Inconel 625 por GTAW na Forma de Múltiplas Camadas sobre Aço Carbono. \ André Luis Stefanello. - Curitiba, 2017.
79 f: il.; tabs.: color.: 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Scheid.

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração Manufatura e Engenharia de Superfícies, Departamento de Engenharia Mecânica, setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Bibliografia: p. 77-79.

1. Ligas metálicas. 2. Liga de Níquel. I. Universidade Federal do Paraná. II. Scheid, Adriano. III. Título.

CDD 620.1


TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANDRÉ LUIS STEFANELLO** intitulada: **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICO-METALÚRGICA DO REVESTIMENTO DE LIGA DE NÍQUEL INCONEL 625 POR GTAW NA FORMA DE MÚLTIPLAS CAMADAS SOBRE AÇO CARBONO**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 26 de Setembro de 2017.


ADRIANO SCHEID
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


GELSON BISCAIA SOUZA
Avaliador Externo (UEPG)


CARLOS EDUARDO FORTIS KWIETNIEWSKI
Avaliador Externo (UFRGS)

Curitiba, 26 de Setembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Adriano Scheid pela orientação, dedicação e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho e principalmente pela sua grande amizade.

Aos meus pais, irmãos, esposa e filho pelo incentivo, apoio e compreensão durante o tempo em que me dediquei a este trabalho.

Aos Amigos de Verdade pelas oportunidades em dividir os eventos da vida, próximos ou distantes são gigantes, sempre presentes.

Agradeço também aos professores, secretário e colegas de curso do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná.

Às empresas TRIENG e Solve pelo apoio na produção e usinagem dos revestimentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, bem como, aos especialistas e colaboradores do LAMEF, Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e seus grupos GAF, GECOR e GEM pelo suporte nas etapas laboratoriais.

RESUMO

Ligas à base de Níquel são utilizadas para proteger superfícies de componentes mecânicos em diversos setores industriais como refinarias de petróleo e equipamentos de geração de energia, devido à associação de tenacidade e alta resistência à corrosão. Estas propriedades estão associadas à composição química e à microestrutura dos revestimentos que por sua vez, dependem dos parâmetros de processo e da composição química do componente a ser protegido. Este trabalho avaliou o impacto no processamento de múltiplas camadas de revestimento sobre a composição química, a diluição e a microestrutura obtida nos revestimentos com a liga Inconel 625 (IN625) depositada sobre aço-carbono AISI 1020 pelo processo de Soldagem a Arco Gás-Tungstênio (GTAW). Visando realizar uma análise do efeito da microestrutura sobre as propriedades da liga, uma chapa laminada a quente na espessura de 3 mm foi caracterizada metalurgicamente quanto à microestrutura e fases formadas. As propriedades mecânicas foram avaliadas através de dureza Vickers e ensaios de microtração. A microestrutura dos revestimentos é composta por regiões γ (Ni-CFC) dendríticas e interdendríticas enriquecidas em Molibdênio e Nióbio, com a presença de carbonetos destes elementos. O processamento de múltiplas camadas de revestimento levou a uma redução da diluição entre liga e substrato, obtendo-se assim maior dureza, resistência mecânica e ductilidade para o revestimento na terceira camada. A análise comparativa com a condição laminada permitiu demonstrar a grande importância da microestrutura sobre as propriedades da liga IN625, evidenciando a forte redução da resistência ao escoamento e à tração induzidas pela estrutura dendrítica de solidificação dos revestimentos.

Palavras-chave: Engenharia de superfícies. Revestimento com múltiplas camadas. Inconel 625. Microtração. Diluição. Soldagem GTAW. Indústria do Petróleo.

ABSTRACT

Nickel-based alloys are used to protect the surface of mechanical parts in various different industrial sectors, as oil refinery and power generation equipment due to an association of toughness and high corrosion resistance. These properties are associated with the chemical composition and microstructure of the coatings which depend on processing parameters and chemical composition of the substrate to be protected. This work assesses the impact of processing multi-layer coatings on the chemical composition, dilution and microstructure of the Inconel 625 (IN625) alloy coatings deposited by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). The effect of IN625 alloy microstructure on the mechanical properties was assessed comparing the coatings with rolled alloy condition. Therefore, rolled IN625 alloy was also characterized by way of microstructure and phases formed. Vickers hardness and micromechanical tensile testing were adopted to evaluate the mechanical properties of the coatings. Coatings microstructure is comprised of γ (Ni-FCC) dendrites and interdendritic regions containing higher Molybdenum and Niobium, as well as Molybdenum-Niobium carbides. Multilayer processing reduced the dilution with the substrate as well as induced higher hardness, yield and tensile strength and ductility for the third layer coatings. A comparative analysis rolled-coatings highlight the relevance of the microstructure effect on the properties of the IN625 alloy, evidencing a strong reduction on the yield and tensile strength, both associated with the coating solidification microstructure.

Keywords: Surface engineering. Multilayer coatings. Cladding. Inconel 625. Microtensile tests. Dilution. GTAW welding. Oil and gas industry.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MACRO ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	29
FIGURA 2 - CROQUI EM CORTE PARA A DEPOSIÇÃO DAS MÚLTIPLAS CAMADAS DE REVESTIMENTO NA PAREDE INTERNA DO TUBO ..	30
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA COMPACTO PARA A FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR GTAW ...	32
FIGURA 4 - ABORDAGEM PADRÃO PARA A MEDIDA DA DILUIÇÃO EM CORDÕES ÚNICOS.....	33
FIGURA 5 - ESQUEMA EM CORTE MOSTRANDO A METODOLOGIA UTILIZADA NA AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS REVESTIMENTOS (ESPECTROMETRIA ÓPTICA).....	34
FIGURA 6 - CORPO DE PROVA ADOTADO PARA OS ENSAIOS DE MICROTRAÇÃO (mm).....	35
FIGURA 7 - ESQUEMA MOSTRANDO A RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE MICROTRAÇÃO A PARTIR DE ELETROEROSÃO	36
FIGURA 8 - (A) MÁQUINA MTS COM EXTENSÔMETRO A LASER UTILIZADA PARA ENSAIO DE MICROTRAÇÃO; (B) FIXAÇÃO DO CORPO DE PROVA; (C) FIM DO ENSAIO COM ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA E LEITURA DO DESLOCAMENTO POR LASER	37
FIGURA 9 - MICROESTRUTURA TÍPICA DA LIGA IN625 LAMINADA: (A) TRANSVERSAL; (B) LONGITUDINAL. ATAQUE QUIMICO: BEHARA	39
FIGURA 10 - MICROESTRUTURA TÍPICA DA LIGA IN625 LAMINADA: (A) 1000X; (B) 3000X.....	39
FIGURA 11 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA LIGA IN625 LAMINADA.....	40
FIGURA 12 - EDS TÍPICO DAS FASES ENCONTRADAS EM CONTO DE GRÃO (SPECTRUM 1-5) E DA MATRIZ (SPECTRUM 6).....	41
FIGURA 13 - CURVA TÍPICA TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO PARA A LIGA IN625 LAMINADA	42
FIGURA 14 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO CHAPA LAMINADA	43

FIGURA 15 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO CHAPA LAMINADA NA REGIÃO DE FRATURA: (A) 500X; (B) 2000X	43
FIGURA 16 - IMAGEM TÍPICA DA SUPERFÍCIE DOS REVESTIMENTOS PROCESSADOS NA PAREDE INTERNA DO TUBO PARA ESTE TRABALHO.....	44
FIGURA 17 - MACROGRAFIA EM SEÇÃO TRANSVERSAL DOS REVESTIMENTOS	45
FIGURA 18 - DILUIÇÃO ENCONTRADA NAS CAMADAS 1, 2 E 3	46
FIGURA 19 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA VERIFICADA.....	47
FIGURA 20 - EDS TÍPICO REALIZADO NAS FASES ENCONTRADAS DOS REVESTIMENTOS: SPECTRUM 1 E 2 – CARBONETOS; SPECTRUM 3 - DENDRITAS DE NI-CFC; SPECTRUM 4 - REGIÃO INTERDENDRÍTICA	48
FIGURA 21 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA LIGA IN625, CAMADA 1.....	49
FIGURA 22 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 1: Mo, Nb	49
FIGURA 23 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 1: Ni, Cr, Fe	50
FIGURA 24 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA LIGA IN625, CAMADA 2.....	50
FIGURA 25 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 2: Mo, Nb	51
FIGURA 26 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 2: Ni, Cr, Fe	51
FIGURA 27 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA LIGA IN625, CAMADA 3.....	52
FIGURA 28 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 3: Mo, Nb	52

FIGURA 29 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 3: Ni, Cr, Fe	53
FIGURA 30 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) FORMADA NAS CAMADAS DOS REVESTIMENTOS (MICROSCÓPIO ÓPTICO). ATAQUE QUÍMICO: BEHARA.....	54
FIGURA 31 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 1. ATAQUE ELETROLÍTICO: ÁCIDO OXÁLICO SATURADO (3V)	55
FIGURA 32 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 1. A IMAGEM INFERIOR TRATADA MOSTRA OS CARBONETOS.....	55
FIGURA 33 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 2. ATAQUE ELETROLÍTICO: ÁCIDO OXÁLICO SATURADO (3V)	56
FIGURA 34 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 2. A IMAGEM INFERIOR TRATADA MOSTRA OS CARBONETOS.....	56
FIGURA 35 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 3. ATAQUE ELETROLÍTICO: ÁCIDO OXÁLICO SATURADO (3V)	57
FIGURA 36 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 3. A IMAGEM INFERIOR TRATADA MOSTRA OS CARBONETOS.....	57
FIGURA 37 - DUREZA DOS REVESTIMENTOS NAS CAMADAS 1, 2, 3.....	58
FIGURA 38 - CURVAS TÍPICAS EM TRAÇÃO PARA OS REVESTIMENTOS	60
FIGURA 39 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 1	60
FIGURA 40 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 2.....	60
FIGURA 41 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 3.....	61
FIGURA 42 - SUPERFÍCIE DE FRATURA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 1	61

FIGURA 43 - SUPERFÍCIE DE FRATURA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 2.....	62
FIGURA 44 - SUPERFÍCIE DE FRATURA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 3.....	63
FIGURA 45 - DIFRATOGRAMAS COMPARATIVOS PARA AS DIVERSAS CONDIÇÕES ANALISADAS.....	66
FIGURA 46 - COMPARATIVA DE DUREZA DOS REVESTIMENTOS E DA CHAPA LAMINADA.....	67
FIGURA 47 - COMPARATIVA DAS MÉDIAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS EM TRAÇÃO: LIMITE DE ESCOAMENTO (R_e), LIMITE DE RESISTENCIA A TRAÇÃO (R_m).....	69
FIGURA 48 - COMPARATIVA DO ALONGAMENTO EM TRAÇÃO OBTIDA PARA A CHAPA LAMINADA E PARA OS REVESTIMENTOS DAS CAMADAS 1, 2 E 3	70
FIGURA 49 - FRAÇÃO DE CARBONETOS TIPO MC ENCONTRADO NOS REVESTIMENTOS PARA AS CAMADAS 1, 2 E 3.....	70
FIGURA 50 - CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO PARA A CAMADA 1 ACOMPANHANDO AS DIREÇÕES DE SOLIDIFICAÇÃO.....	72
FIGURA 51 - CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO PARA A CAMADA 1 MOSTRANDO LINHAS DE DEFORMAÇÃO	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PERCENTUAL DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA A LIGA INCONEL 625.....	24
TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA INCONEL 625.....	25
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS (wt.%).....	30
TABELA 4 - PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO GTAW.....	31
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CHAPA LAMINADA.....	38
TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA INCONEL 625 NO ESTADO COMO LAMINADO.....	42
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR GTAW.	44
TABELA 8 - VALORES MÉDIOS PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS REVESTIMENTOS DE LIGA INCONEL 625	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIES.....	18
3.1.1	Aspectos tecnológicos em revestimentos - Hardfacing	19
3.2	NÍQUEL E SUAS LIGAS.....	20
3.2.1	Revestimentos superficiais com ligas de níquel	21
3.2.2	Superligas e o Inconel 625	22
3.2.3	Propriedades químicas e mecânicas da liga Inconel 625	24
3.2.4	Mecanismos de endurecimento das ligas de níquel	25
3.2.5	Endurecimento por soluções sólidas	25
3.2.6	Endurecimento pela formação de carbonetos	26
3.2.7	Endurecimento pela formação de fases intermetálicas	26
3.3	SUBSTRATO UTILIZADO	26
3.4	PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW.....	27
3.4.1	Vantagens e desvantagens do processo GTAW	28
4	METODOLOGIA	29
4.1	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1.1	Materiais e Procedimento de Deposição	29
4.1.2	Diluição dos Revestimentos.....	32
4.1.3	Quantificação de fração de fases, Software Image J®	34
4.1.4	Avaliação das Propriedades Mecânicas dos Revestimentos.....	35
5	RESULTADOS	38
5.1	MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DA LIGA INCONEL 625 LAMINADA	38
5.2	ASPECTO SUPERFICIAL, DEFEITOS E DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS	43
5.3	MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS.....	47
5.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS REVESTIMENTOS.....	58
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	64

6.1	EFEITO DA DEPOSIÇÃO DE MÚLTIPLAS CAMADAS SOBRE A COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS	64
6.2	EFEITO DA DEPOSIÇÃO DE MÚLTIPLAS CAMADAS SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS	66
7	CONCLUSÃO	74
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A indústria de óleo e gás vem trabalhando para reduzir paradas de manutenção em instalações, sendo esta uma busca contínua, uma vez que muitos componentes devem operar em condições agressivas. A proteção da superfície com revestimentos de alto desempenho é uma escolha potencial, resultando normalmente a partir da combinação de materiais e processos avançados. Os revestimentos têm se mostrado atrativos quando processados sobre a superfície dos aços.

Ligas à base de níquel têm sido consideradas na proteção de componentes de engenharia para resistir a condições agressivas operacionais encontradas na indústria petroquímica, em reatores nucleares, unidades de processamento de alimentos e de produção de óleo e gás. A microestrutura, composição química e a taxa de resfriamento na solidificação podem alterar significativamente as propriedades de um revestimento depositado superficialmente. Portanto, os parâmetros de processamento e a composição química do substrato de aço devem ser considerados já que modificam as propriedades finais dos revestimentos. A microestrutura e as propriedades dos revestimentos à base de níquel (Ni) podem ser correlacionadas com cada substrato de aço e sua diluição.

As propriedades mecânicas das ligas à base de Ni são uma consequência da estrutura cúbica de face centrada da matriz de níquel, que pode ser reforçada por solução sólida ou segunda fase como carbonetos e / ou intermetálicos. Ferro, cromo, molibdênio, tungstênio, titânio e alumínio são elementos endurecedores por solução sólida em níquel. Níquel não é formador de carbonetos e o carbono pode se combinar com os elementos de liga sob diversas estequiometrias, como: MC, M_6C , M_7C_3 ou $M_{23}C_6$, dependendo da composição química da liga e substrato a ser revestido. A precipitação de intermetálico gama linha γ' ($Ni_3(Al, Ti)$) em uma matriz de elevado teor de níquel também proporciona reforço para o material, principalmente após o tratamento térmico.

Considerando-se a liga Inconel 625 (IN625), o elemento nióbio também é adicionado ao sistema de liga de níquel-cromo-molibdênio, como endurecedor por solução sólida e, em conjunto com o molibdênio, que pode proporcionar uma elevada resistência sem tratamento térmico. O teor de cromo superior a 15% em peso proporciona alta resistência à oxidação. Este sistema de liga é utilizado na

manufatura de componentes com proteção superficial (revestimento) em uma grande variedade de ambientes. Além disso, esta liga apresenta boa soldabilidade, facilitando os procedimentos de soldagem ou *hardfacing*.

Revestimentos sobre substratos de aço são considerados, já que as ligas ferrosas apresentam propriedades atraentes e baixo custo relativo. Os aços microligados apresentam elementos como nióbio e vanádio e baixo teor de carbono, resultando em uma microestrutura com refinado tamanho de grão e formação de carbonetos finamente dispersos. Com isto, são obtidos elevada resistência mecânica e, ao mesmo tempo, boa soldabilidade. Por estas razões, os aços carbono microligados seriam uma opção óbvia, já que são largamente usados pela indústria petrolífera. Um exemplo de substrato potencial dentro desta classe é o aço microligado API 5L X70. Entretanto, considerando a proposta de abordagem do efeito da diluição sobre as características mecânico-metalúrgicas dos revestimentos de liga IN625, foi adotado o aço AISI 1020, em decorrência do seu menor custo e da similaridade de composição química com relação ao aço API 5L X70.

Muitos trabalhos estão sendo realizados quanto ao modelamento numérico do perfil da seção dos cordões de solda depositados e do grau de sobreposição e seu efeito sobre o acabamento superficial dos revestimentos. A largura e a altura do cordão de solda, além da área da seção transversal de um único cordão de solda, bem como o percentual de sobreposição têm grande influência sobre a qualidade da superfície, precisão dimensional e desempenho mecânico. Ainda, a indústria petrolífera muitas vezes requer a deposição de duas ou três camadas de revestimento, o que reduz a diluição e assegura uma espessura mínima de projeto para o revestimento protetivo. Diversos trabalhos mostram o efeito da sobreposição para a produção de revestimentos de única camada. Apesar disso, pouca referência é encontrada sobre o efeito da produção de revestimentos a partir de múltiplas camadas protetivas.

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito da produção de múltiplas camadas de revestimento protetor de liga IN625 depositado sobre um substrato em aço carbono AISI 1020 e caracterizar mecânico-metalurgicamente estes revestimentos soldados. Comparativamente, uma chapa de liga IN625 laminada a quente foi caracterizada e avaliada como referência. Os revestimentos depositados com a liga IN625 foram caracterizados por meio da: diluição; composição química; microestrutura; e propriedades micromecânicas.

Os resultados mostraram que a diluição é significativamente reduzida à medida que uma nova camada de revestimento é depositada sobre a camada anterior. A terceira camada mostrou composição química muito semelhante à composição nominal da liga IN625 ou da chapa laminada a quente.

Uma diferença pequena de dureza foi observada para a liga IN625 na forma de revestimentos nas condições estudadas. Ficou evidente que a realização de ensaios de tração se mostram complementares na avaliação das diferenças promovidas pelo processamento. A menor resistência mecânica dos revestimentos em relação à chapa conformada está associada diretamente às diferenças microestruturais. Por outro lado, importantes diferenças são também introduzidas como consequência da maior diluição, refletindo especialmente na redução da resistência e do alongamento dos revestimentos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi investigar as características mecânico-metalúrgicas de múltiplas camadas do revestimento de liga Inconel 625, obtidas pelo processo de soldagem GTAW sobre um substrato tubular de aço carbono. A partir da deposição de uma, duas e três camadas, as propriedades mecânicas foram estudadas e avaliadas em relação a diluição e microestrutura. Também, foi realizada uma avaliação das propriedades dos revestimentos em comparação à liga IN625 no estado laminado.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- a) Caracterizar a composição química e diluição desenvolvida para revestimentos de liga IN625 depositados a partir de uma, duas e três camadas pelo processo GTAW;
- b) Analisar da microestrutura e das fases formadas nas camadas depositadas, e a diluição obtida para a 1ª, 2ª e 3ª camadas de revestimento;
- c) Avaliar as propriedades mecânicas (microtração) e dureza das três camadas de revestimento.
- d) Analisar comparativamente os revestimentos soldados com uma chapa de IN625 laminada a quente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão sobre revestimentos em superfícies, sua utilização e aspectos tecnológicos, ligas de Ni e suas propriedades, bem como o processo de deposição de material utilizado neste trabalho.

3.1 REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIES

Os revestimentos protetivos depositados em superfícies têm despertado amplo interesse de vários setores industriais, principalmente pelos ganhos relacionados à confiabilidade de componentes que operam em ambientes com atmosferas agressivas, além da redução dos custos de fabricação e operacionais obtidos em relação a componentes fabricados unicamente a partir de material de superligas.

Aumentos consideráveis no desempenho de componentes e equipamentos são obtidos pela utilização de materiais nobres (como as superligas de níquel, cobalto ou ferro) sobre substratos estruturais de aços, a fim de melhorar propriedades como: resistência à corrosão e oxidação, resistência ao desgaste, tenacidade e vida em fadiga (VENKATESH; SRIKER; PRABHAKAR, 2015).

Em relação aos custos de fabricação, este é um ponto que impulsiona o desenvolvimento e requer destaque na justificativa da utilização dos revestimentos superficiais. Quando comparados aos custos para a obtenção de peças fabricadas a partir de materiais nobres, os revestimentos podem viabilizar a sua utilização em diversos casos (KIM; PARK; LEE, 2015).

A NORSOK Standard M-001, norma desenvolvida pela indústria do petróleo norueguesa, fornece requisitos e práticas para a seleção de materiais e proteção contra corrosão na produção de hidrocarbonetos para os diferentes sistemas presentes nas unidades de exploração, plataformas fixas e sistemas *subsea*, considerando ciclo de vida mínimo de 20 anos para proteção contra corrosão. A seleção de ligas de níquel para revestimento, como a IN625, está presente em sistemas e equipamentos como: árvore de natal, cabeça do poço, sistema de injeção de água, unidades de exaustão e recuperação dos gases de turbinas, e elementos de fixação (STANDARDS NORWAY, 2014).

São diversos os processos utilizados na obtenção de revestimentos protetores em superfícies de componentes estruturais. Dentre eles pode-se citar:

- a) Deposição por soldagem;
- b) Soldagem por explosão;
- c) Aspersão térmica;
- d) Colaminação de chapas;
- e) Galvanização;
- f) Pintura.

3.1.1 Aspectos tecnológicos em revestimentos - Hardfacing

O *hardfacing* constitui do processamento de ligas com características específicas sobre um substrato, com o objetivo de aumentar a resistência ao desgaste e corrosão da superfície de um determinado componente. Sua aplicação atingiu grande representatividade industrial ao longo dos últimos anos, devido à redução dos custos de fabricação, quando da utilização das técnicas de revestimento superficial com materiais mais nobres sobre substratos estruturais de baixo custo.

As ligas para *hardfacing* são frequentemente depositadas sobre substratos de ligas ferrosas para ganhos expressivos na resistência ao desgaste das superfícies de componentes e ferramentas, aumentando diretamente o seu tempo em serviço. O desgaste das superfícies de peças e equipamentos é talvez o fator mais importante a ser tratado pela indústria, seja por abrasão, erosão, tensão de contato (desgaste-fadiga) ou corrosão, pois afeta diretamente o tempo médio entre paradas de manutenção das máquinas (VENKATESH; SRIKER; PRABHAKAR, 2015). A seleção destes materiais protetivos ocorre quando as condições de operação são críticas, sendo uma excelente opção para ambientes envolvendo altas temperaturas de trabalho, meios corrosivos e em situações de elevado atrito ou caso esteja presente uma condição limitada de lubrificação entre as superfícies.

As características e o desempenho de revestimentos são largamente investigados por vários autores. Recentemente foram avaliados os efeitos, na microestrutura e o mecanismo de corrosão, da dissolução de partículas esféricas de carboneto de tungstênio WC, Spherotene®, pulverizadas em fase líquida junto à liga IN625 (ABIOYE et al., 2016). As partículas esféricas de WC Spherotene® possuem

elevada dureza, 3000HV +/-500HV, o produto é patenteado pela Laser Cladding Technology Ltd (LASER CLADING TECHNOLOGY, 2016).

A escolha do processo de deposição por soldagem para as ligas de *hardfacing* também deve passar por critérios de seleção rigorosos, a fim de assegurar propriedades superficiais desejadas. Dentre os vários processos de soldagem utilizados, o processo por *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) é um dos mais aplicados e garante excelentes resultados devido ao bom controle dos parâmetros de deposição do revestimento aliado ao custo mais baixo de deposição, sendo frequentemente apontado como uma ótima opção técnico-econômica.

Além da escolha do processo de soldagem adequado para a deposição da liga e obtenção da superfície revestida, a geometria dos componentes, bem como a microestrutura e as fases formadas decorrentes da mistura revestimento/substrato (diluição), induzem comportamento (desempenho) específico e distinto. Como exemplo, pode-se citar que a resistência à abrasão está intrinsecamente ligada à morfologia das fases presentes no material, ao padrão de distribuição das mesmas (exemplo dos carbonetos) e à estrutura da matriz obtida. No caso de ligas Fe-Cr-C, são formados carbonetos de cromo, conferindo altíssima dureza superficial (VENKATESH; SRIKER; PRABHAKAR, 2015).

Desta forma, existem diversas ligas para revestimentos utilizadas no mercado, e que merecem destaque (VENKATESH; SRIKER; PRABHAKAR, 2015):

- a) Ligas a base de Ni, com adições de Fe-Nb, Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-C;
- b) Ligas a base de Fe (Fe-Cr-C, Fe-Cr-C-Nb / Ti, Fe-Cr-C-Mn), com adição de Ni, Si, Mo, B e W;
- c) Ligas a base de Co, reforçadas com carbonetos (*Stellites*) ou com intermetálicos de Laves (*Triballoys*);
- d) Ligas livres de Co, NOREM (Fe-Cr-Mn-Ni-Mo-Si-C) desenvolvidas para substituir as ligas *Stellites*, com o objetivo de redução dos níveis de radioatividade em plantas nucleares (KIM; SUH; KIM, 2007).

3.2 NÍQUEL E SUAS LIGAS

As ligas de níquel (Ni) tem sido largamente utilizadas na fabricação de componentes ou revestimentos para a indústria de processamento químico, produção de petróleo e gás natural *offshore* e *onshore*, refinarias, papel e celulose,

além de usinas nucleares, e indústria aeroespacial. Seu emprego decorre, principalmente, do comportamento do elemento níquel e suas ligas em ambientes corrosivos com presença de cloretos, sulfatos, esforços mecânicos, bem como aplicações em altas temperaturas (VERDI et al., 2014).

3.2.1 Revestimentos superficiais com ligas de níquel

As ligas de níquel são largamente empregadas como materiais para revestimento e proteção das superfícies, sendo utilizadas na maioria dos aços de graus estruturais. Por exemplo, quando processada em superfícies de vasos de pressão em reatores e componentes de segurança do sistema, mitigam os efeitos erosivos do meio corrosivo e radioativo, sendo utilizadas por sua excelente resistência a corrosão sob tensão, *stress corrosion cracking* (SCC) (LI et al, 2015).

Diversos setores industriais vêm realizando estudos acerca da confiabilidade de revestimentos com ligas de níquel, sendo mandatória a investigação das propriedades mecânicas e microestruturas obtidas nos processos de manufatura. Na indústria nuclear, foi realizado recentemente um estudo comparativo entre os processos de deposição por *Gas Tungsten Arc* (GTA) e *Laser Beam* (LB) para a liga Inconel 52M, que apresenta um teor de cromo suficiente para a formação de película de Cr_2O_3 que atua na proteção superficial contra a corrosão (LI et al., 2015).

Para a liga Inconel 625, pode-se citar o estudo comparativo dos efeitos da diluição na deposição de camada simples e sobre-camada, em substrato de aço inoxidável AISI 304, investigando o desempenho frente à corrosão em solução salina de cloreto de sódio (NaCl), a partir da avaliação da microestrutura dos revestimentos antes e depois dos testes de corrosão (ABIOYE; MCCARTNEY; CLARE, 2015).

A interação entre a liga de revestimento e o substrato é significativa quando envolve processos por soldagem com união metalúrgica. Dependendo dos parâmetros de processamento, uma maior ou menor diluição é observada, impactando em alterações na composição química e na microestrutura final dos revestimentos. Estudo anterior avaliou o efeito da corrente de deposição e do tipo de substrato sobre as características da liga de níquel Hastelloy C276. No estudo, os revestimentos foram produzidos pelo processo Plasma com Arco Transferido (PTA) sobre aços AISI 316L e API 5L X70, com correntes de deposição que variaram entre 120 e 180 A (FERREIRA; GRAF; SCHEID, 2015).

Na soldagem dissimilar, a razão de diluição nas zonas soldadas é um fator relevante. Atualmente, a indústria têm demandado revestimentos de ligas por soldagem a partir da deposição de múltiplas camadas, uma vez que camadas únicas dificilmente atingem os requisitos de resistência a corrosão necessários devido ao alto efeito da diluição, bem como pela espessura mínima especificada para a camada de proteção (KIM; PARK; LEE, 2015).

Na indústria petrolífera, o controle dos processos de fabricação e dos requisitos de qualidade é rigoroso, a fim de alcançar as características mais adequadas para dada aplicação. As práticas de fabricação da BP Group aplicadas para válvulas, vasos de pressão, trocadores de calor, e componentes *subsea*, adotam espessura mínima de 4,5 mm para revestimentos soldados com liga metálica, salvo alterações previamente acordadas. Espessura mínima de 3 mm da camada sobreposta superior do revestimento deve satisfazer os requisitos químicos do material (BP GROUP, ENGINEERING TECHNICAL PRACTICES, 2006).

A TRIENG Técnica Industrial, em reunião técnica sobre revestimentos, comenta que a PETROBRÁS adota espessura mínima de 4 mm para o revestimento de IN625 sobre aços (TRIENG, 2016, não publicado)¹. Concomitantemente, requer o controle do teor de ferro a fim de assegurar bom desempenho frente à corrosão. Por estas razões, em muitos casos são utilizadas múltiplas camadas de revestimento. Adicionalmente, é importante registrar que a diluição eleva o percentual do elemento ferro (elemento base de substratos de aço) durante a deposição. Este elemento deve ser mantido em níveis baixos na liga IN625 uma vez que a elevação do teor de ferro compromete a resistência à corrosão e podem causar fissuras em soldas e revestimentos (SPECIAL METALS, 2014).

Adicionalmente, podem ocorrer trincas na primeira camada de revestimento sobre substratos que contém altos níveis de enxofre, no entanto, há procedimentos simples a serem realizados para a remoção da área fissurada e posterior deposição do revestimento (SPECIAL METALS, 2014).

3.2.2 Superligas e o Inconel 625

¹ TRIENG Técnica Industrial. Reunião técnica sobre revestimentos cladeados por GTAW. Araucária, 2016. Não Publicado.

As superligas à base de níquel possuem excelente capacidade de manufatura e quando utilizadas como material para revestimento protetivo de superfícies oferece diversas vantagens, como o menor custo. A redução do custo fabril e do projeto como um todo, quando comparado, por exemplo, ao processo de fabricação de componentes e tubulações exclusivamente à base de superligas devem ser destacadas (SILVA et al., 2012).

A liga INCONEL[®] 625 (Inconel 625, IN625) é nome comercial e marca registrada da Special Metals Corporation. A liga é designada conforme o Sistema de Numeração Unificado, o termo em inglês *Unified Numbering System*, como sendo UNS N06625 em conformidade à norma W.Nr. 2.4856. Os elementos predominantes são Níquel-Cromo-Molibdênio, os quais levam a uma matriz austenítica níquel-cromo. Já os elementos constituintes molibdênio e nióbio atuam no processo de endurecimento concedendo à liga uma elevada resistência mecânica e tenacidade e sua temperatura de operação pode variar desde a criogenia a até 982°C (SPECIAL METALS, 2013).

A combinação dos elementos presentes nesta superliga proporciona elevada resistência à oxidação e à corrosão, o que favorece sua utilização em ambientes altamente corrosivos com a presença de cloretos e sulfatos. A utilização do Inconel 625 é abrangente e está presente em vários setores industriais e nas mais diversas aplicações como: propulsores submarinos, controladores e transdutores, válvulas, tubulação, componentes de reatores nucleares, turbinas e outros componentes aeroespaciais (KIM; PARK; LEE, 2015; SPECIAL METALS, 2013).

Na indústria petroquímica, a utilização da liga Inconel 625 vem crescendo em conjunto com processos de revestimento de superfícies, sendo empregados em equipamentos complexos, como Juntas Flexíveis para conexão de *Risers* rígidos às unidades de produção flutuantes presentes em alto mar, do termo em inglês *Floating Production Units* (FPU). Estes componentes proporcionam flexibilidade rotacional ao sistema interligado e são constantemente submetidos a elevados carregamentos mecânicos (ZUMPANO et al., 2015).

Devido a sua alta tenacidade e excelente resistência a oxidação em diversos meios corrosivos, a liga IN625 é empregada em ferramentas de alto custo utilizadas para a perfuração de poços de petróleo bruto (ABIOYE et al., 2016).

Ainda na indústria petroquímica, a deposição da liga Inconel 625 como material de revestimento interno de tubulações de aço carbono tem sido uma

excelente alternativa para a proteção do aço estrutural ao contato com o fluido transferido (óleo cru). Neste caso, o óleo cru e seus derivados apresentam contaminantes na sua composição como Cloretos, H_2S e CO_2 . Estes contaminantes atuam agravando processos corrosivos, causando danos às estruturas e equipamentos (KIM; PARK; LEE, 2015).

Este contexto destaca a agressividade que os materiais encontram em operação, motivando este projeto de pesquisa. Acrescenta-se aqui a limitada disponibilidade de literatura técnica acerca do assunto, em especial sobre revestimentos soldados, suas propriedades e características mecânico-metalúrgicas.

3.2.3 Propriedades químicas e mecânicas da liga Inconel 625

A liga Inconel 625 possui a composição química nominal apresentada na TABELA 1. As propriedades mecânicas normalmente encontradas são apresentadas na TABELA 2, considerando ensaio em temperatura ambiente.

TABELA 1 - PERCENTUAL DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA A LIGA INCONEL 625

ELEMENTO	% ESPECIFICADO
Níquel	58,0 mínimo
Cromo	20,0 - 23,0
Ferro	5,0 máximo
Molibdênio	8,0 - 10,0
Nióbio (+ Tântalo)	3,15 - 4,15
Carbono	0,1 máximo
Manganês	0,5 máximo
Silício	0,5 máximo
Oxigênio	Não especificado
Fósforo	0,015 máximo
Enxofre	0,015 máximo
Alumínio	0,40 máximo
Titânio	0,40 máximo
Cobalto (se determinado)	1,0 máximo

FONTE: Adaptado de SPECIAL METALS, 2013

TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA INCONEL 625

FORMA E CONDIÇÃO	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (MPa)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	DEFORMAÇÃO (%)	REDUÇÃO DE ÁREA (%)	DUREZA (BRINELL)
HASTE, BARRA, PLACA					
Laminado	827-1103	414-758	60-30	60-40	175-240
Recozido	827-1034	414-655	60-30	60-40	145-220
Solubilizado	724-896	290-414	65-40	90-60	116-194
FOLHA, TIRA					
Recozido	827-1034	414-621	55-30	-	145-240

FONTE: Adaptado de SPECIAL METALS, 2013

3.2.4 Mecanismos de endurecimento das ligas de níquel

Com estrutura cúbica de faces centradas (γ -CFC), o níquel pode ser endurecido por meio de três mecanismos diferentes: soluções sólidas, formação de carbonetos e endurecimento por envelhecimento para formação de fases intermetálicas.

3.2.5 Endurecimento por soluções sólidas

Os elementos cobalto, ferro, tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, titânio, e alumínio são elementos que promovem o endurecimento por solução sólida em níquel. Estes elementos apresentam raio atômico diferente do níquel, com variação entre 1 e 13%. A expansão do reticulado cristalino, relacionado à diferença de raio atômico determina o efeito observado sobre a resistência mecânica. Elementos como molibdênio e tungstênio apresentam maior raio atômico e, portanto, maior efeito sobre este mecanismo de aumento de resistência (ASM HANDBOOK, 1992).

3.2.6 Endurecimento pela formação de carbonetos

Considerando que o elemento níquel não é formador de carbonetos, a formação ocorre a partir do carbono e dos elementos de liga adicionados. Os carbonetos observados nas ligas de níquel são do tipo MC, M_6C , M_7C_3 e $M_{23}C_6$, onde M é o elemento de liga formador de carbonetos. Os tipos MC e M_6C apresentam-se normalmente como partículas pequenas do tipo *Blocky*. Por outro lado, os tipos M_7C_3 e $M_{23}C_6$ podem se apresentar como partículas dispersas (o que não é um problema), ou na forma de filmes, quando expostos a longos períodos de tempo a elevada temperatura (ASM HANDBOOK, 1992).

3.2.7 Endurecimento pela formação de fases intermetálicas

A precipitação de γ' $Ni_3(Al, Ti)$ ocorre em ligas de alto níquel, e apresenta estrutura cúbica de faces centradas com diferença de apenas 1% no parâmetro de rede em relação à estrutura γ -CFC do níquel. Esta pequena diferença na estrutura das fases é responsável pela baixa energia de interface $\gamma' - \gamma$, conferindo estabilidade termodinâmica (ASM INTERNATIONAL, 1990). Considerando que a liga IN625 não apresenta endurecimento por este mecanismo, este tópico não será explorado em detalhe.

3.3 SUBSTRATO UTILIZADO

Os substratos de aço carbono, por possuírem baixo custo, são as melhores opções de materiais a serem revestidos. Neste trabalho, foi utilizado o aço AISI 1020 como substrato, devido à sua similaridade de composição com os aços microligados e o seu baixo custo. A norma API 5L utilizada no setor de petróleo e gás natural, especifica os requisitos de manufatura para tubulação, além da *API Specification 5LD* referente a tubulações em aço carbono revestidas com ligas resistentes a corrosão, *corrosion resistant alloys* (CRA) (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013). Considerando a proximidade de composição química observada para o teor de ferro e carbono (ex. API 5L X70 – maior que 98 wt% Fe e percentual de carbono de 0,17 wt%, enquanto o aço AISI 1020 – maior que 99 wt% Fe e percentual de

carbono de 0,21 wt%), os objetivos deste trabalho e os custos associados, decidiu-se trabalhar com o segundo substrato. Adicionalmente, vale destacar que o efeito sobre a diluição foi avaliado e este aspecto está diretamente relacionado à mistura da liga de adição (IN625) e substrato (aço carbono) sendo, portanto, bastante equivalente.

3.4 PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW

O processo de fabricação utilizado neste trabalho é o Soldagem a Arco Gás-Tungstênio (GTAW), termo oriundo do inglês *Gas Tungsten Arc Welding*, também conhecido como *Tungsten Inert Gas* (TIG).

O processo de soldagem GTAW proporciona a união de peças, bem como a deposição de revestimentos metálicos sobre superfícies, através do aquecimento e fusão dos metais. O processo ocorre por meio de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo de tungstênio (elemento não-consumível e conectado a tocha) e os materiais metálicos envolvidos no processo de união (KUO, 2002).

Como meio de proteção ao ambiente externo, e a fim de evitar contaminação durante o processo de soldagem, faz-se necessária a utilização de um gás de proteção entre o eletrodo e a região de soldagem, sendo direcionado para a poça de fusão através do corpo da tocha. Geralmente são utilizados gases inertes como argônio e hélio ou, até mesmo, uma mistura destes. E com menos frequência, pode-se encontrar a adição de gases não inertes à mistura para formação da proteção gasosa que envolve a poça de fusão (KUO, 2002).

Gholipour et al. (2011) relata que existem alguns processos simples e mais efetivos quando analisados em relação ao seu custo relativo, como o processo de deposição a arco com proteção gasosa GTAW. Segundo o autor, este método é altamente eficiente e perfeito para a produção de revestimentos, quando analisado sob ponto de vista técnico-econômico.

Mellor (2006) mostra que, embora a técnica GTAW seja um método com um grande potencial técnico-econômico, ela sofre com algumas desvantagens em relação a outros processos de deposição. Segundo o autor, a presença de áreas diluídas nas peças soldadas é inevitável e o percentual de diluição depende dos parâmetros de deposição, podendo alcançar 30% da zona soldada.

3.4.1 Vantagens e desvantagens do processo GTAW

A soldagem GTAW possui a característica de permitir um bom controle operacional do processo, garantindo alta qualidade e excelente acabamento. O processo é amplamente conhecido e controlado e, conforme já mencionado em diversos trabalhos, como Modenesi (2006) e Kuo (2002), as principais vantagens do GTAW são:

- a) O processo possui excelente controle da poça de fusão;
- b) Produz soldas de alta qualidade e acabamento;
- c) Pode produzir solda com ou sem metal de adição;
- d) Permite a mecanização do processo e também sua automação;
- e) Não produz respingos como em outros processos de soldagem;
- f) A limpeza pós-soldagem não é preocupante como em outros processos;
- g) Pode-se soldar em todas as posições;
- h) As fontes de energia utilizadas são de baixo custo;
- i) As variáveis de soldagem possuem controle preciso;
- j) Pode ser facilmente utilizado em materiais dissimilares.

Conforme também relatado pelos mesmos autores, podemos levantar algumas desvantagens e limitações do processo GTAW quando comparado a outros processos de soldagem como sendo:

- a) Taxas de deposição menores em relação a outros processos, reduzindo a produtividade;
- b) Custo relativamente elevado dos consumíveis e do equipamento;
- c) Podem ocorrer inclusões de tungstênio caso haja o contato do eletrodo com a poça de fusão;
- d) A proteção gasosa deve ser adequada caso contrário pode haver contaminação da solda.

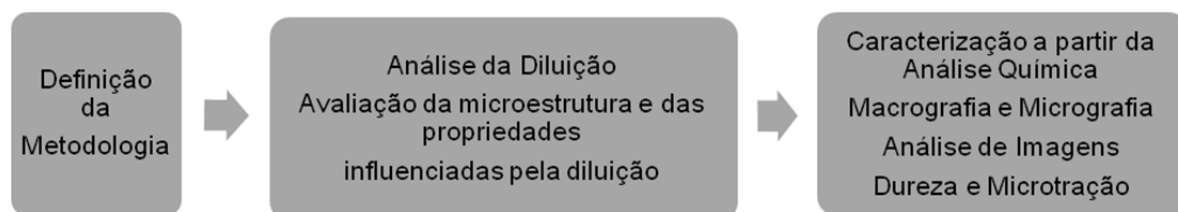
4 METODOLOGIA

Neste capítulo, são detalhadas as principais técnicas e métodos de avaliação utilizados para esta pesquisa. São descritos também, os ensaios e análises especiais que permitiram avaliar a relação microestrutura-propriedades, como microtração uniaxial. A metodologia escolhida foi baseada nas limitações impostas pelas condições geométricas dos revestimentos. Destaca-se especialmente a limitada espessura dos revestimentos, fator este que configura uma dificuldade adicional para a avaliação das propriedades mecânicas.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da FIGURA 1 apresenta as macroetapas do desenvolvimento deste projeto.

FIGURA 1 - MACRO ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO



FONTE: O autor (2016)

4.1.1 Materiais e Procedimento de Deposição

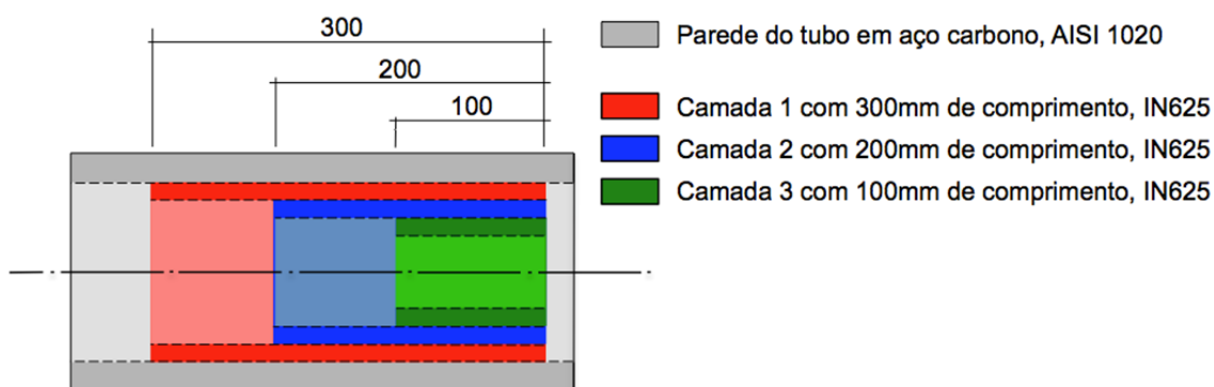
A liga de níquel IN625 foi depositada sobre a parede interna de um substrato tubular em aço carbono AISI 1020, a partir do processo GTAW com alimentação automática de arame, conforme mostrado no croqui da FIGURA 2. A primeira camada de IN625 (Camada 1) foi depositada sobre a parede interna do substrato tubular em aço carbono AISI 1020 ao longo de 300mm, em seguida foi depositada a segunda camada de IN625 (Camada 2) sobre a primeira camada ao longo de 200mm, por último foi depositada a terceira camada de IN625 (Camada 3) sobre a segunda camada ao longo de 100mm.

A composição química dos materiais envolvidos no processo (material de adição e substrato), bem como os parâmetros utilizados no processo por deposição GTAW estão apresentados, respectivamente, nas TABELAS 3 e 4.

Para o alívio das tensões internas oriundas do processo de soldagem, os revestimentos foram submetidos ao processo de recozimento na temperatura de 625°C por 4 horas, conforme especificação interna de tratamento térmico pós-soldagem da empresa TRIENG Técnica Industrial.

Apesar da boa qualidade da superfície dos revestimentos, nesta abordagem é compulsória a usinagem da superfície, removendo no mínimo 0,5 mm antes do uso do material revestido, a fim de eliminar irregularidades superficiais.

FIGURA 2 - CROQUI EM CORTE PARA A DEPOSIÇÃO DAS MÚLTIPLAS CAMADAS DE REVESTIMENTO NA PAREDE INTERNA DO TUBO



FONTE: O autor (2016)

TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS (wt.%)

LIGA DO REVESTIMENTO (COMPOSIÇÃO DO ARAME IN625)									
Liga / Elemento	Ni	Cr	Mo	Si	C	Fe	Nb	Ti	Al
IN625 ERNiCrMo3	Bal.	21.63	8.71	0.11	0.005	0.28	3.62	0.17	0.11
AÇO CARBONO SAE/AISI 1020									
Substrato	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al
AISI 1020	0.21	0.46	0.24	0.017	0.001	0.01	0.01	0.01	0.02

FONTE: IN625, Certificado Novametal do Brasil, N: 94915; AISI 1020, Composição verificada LAMEF-UFRGS (2016)

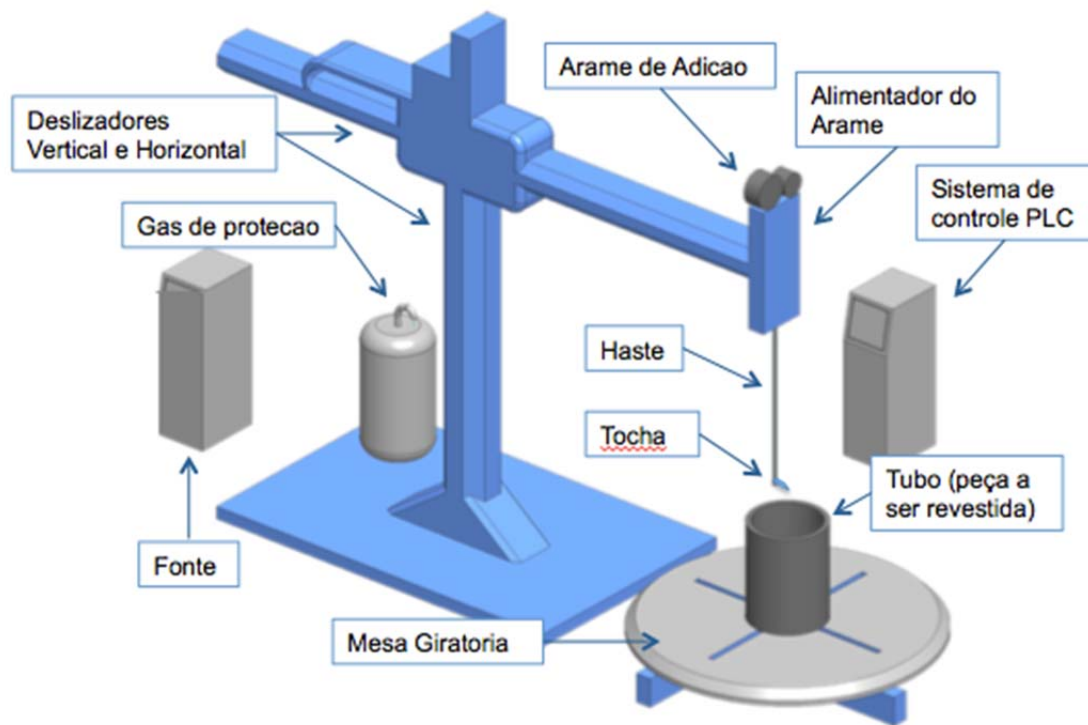
TABELA 4 - PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO GTAW

PARÂMETROS	VALORES
ERNiCrMo3 – Diâmetro do Arame (mm)	1.14
Corrente / Polaridade	DC-
Faixa de Intensidade de Corrente (A)	230 - 240
DDP (V)	9.0 – 10.1
Velocidade de Soldagem (mm/min)	32
Energia (kJ/cm)	4.5
Temperatura de Pré-Aquecimento (°C)	>200
Temperatura de Interpasse (°C)	<350
Gás de Proteção	Argônio
Vazão do Gás de Proteção (L/min)	20
Pré-Limpeza	Química + Mecânica (Escovação)
Limpeza de Interpasse	Mecânica (Escovação)

FONTE: O autor (2016)

A FIGURA 3 mostra a representação de um sistema compacto de soldagem automatizada e seus principais componentes, utilizado no processamento de revestimentos depositados por GTAW. Este sistema é semelhante ao equipamento utilizado neste trabalho para a deposição da liga de Inconel 625 sobre a parede interna do tubo em aço carbono AISI 1020, obtendo assim os revestimentos em forma de múltiplas camadas.

FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA COMPACTO PARA A FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR GTAW



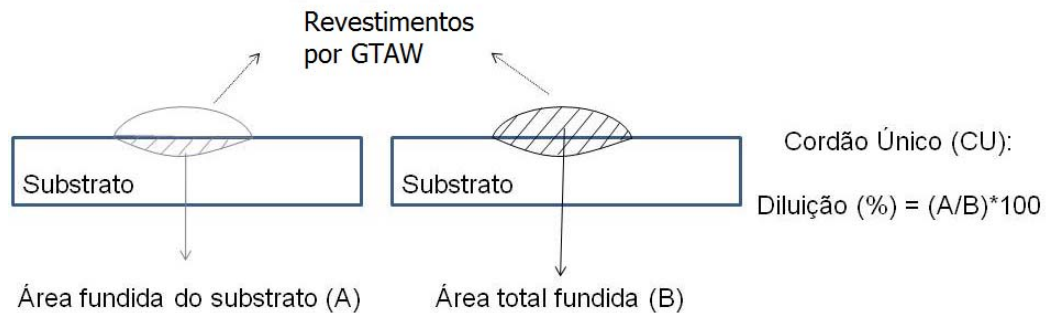
FONTE: O autor (2016)

Este trabalho avaliou experimentalmente o efeito da deposição de múltiplas camadas de revestimentos em relação à: diluição; microestrutura; composição química; e propriedades mecânicas, utilizando a liga IN625 depositada pelo processo GTAW sobre um substrato tubular em aço-carbono AISI 1020.

4.1.2 Diluição dos Revestimentos

É importante destacar que a diluição é, normalmente, determinada a partir da metodologia usada para cordões únicos na seção transversal pela razão entre a área fundida do substrato e a área total fundida do cordão, conforme mostra a FIGURA 4. Entretanto, devido à dificuldade de determinação das áreas, o presente trabalho considerou o cálculo da diluição a partir do teor de ferro medido por espectrometria, e posteriormente equacionado conforme realizado em estudo recente (TOYSERKANI et al., 2005 citado por ABIOYE; MCCARTNEY; CLARE, 2015).

FIGURA 4 - ABORDAGEM PADRÃO PARA A MEDIDA DA DILUIÇÃO EM CORDÕES ÚNICOS



FONTE: o autor (2016)

Conforme Toyserkani et al. (2005) é possível realizar o cálculo da diluição de cada passe, através da obtenção do teor de ferro dos revestimentos. Segundo Toyserkani et al. (2005 citado por ABIOYE; MCCARTNEY; CLARE, 2015), a fórmula apresentada à seguir permite o cálculo da diluição (η) a partir do teor de ferro dos materiais de partida (revestimento (X_c) e substrato (X_s)) e do teor de ferro medido nos revestimentos (X_{c+s}) determinado por espectrometria de fluorescência de raios X, como também da densidade do revestimento (ρ_c) e do substrato (ρ_s), EQUAÇÃO 1.

$$\eta = \frac{\rho_c (X_{c+s} - X_c)}{\rho_s (X_s - X_{c+s}) + \rho_c (X_{c+s} - X_c)}$$

(EQUAÇÃO 1)

Onde,

η - Diluição;

ρ_c - Densidade do revestimento;

ρ_s - Densidade do substrato;

X_c - Teor de ferro do revestimento;

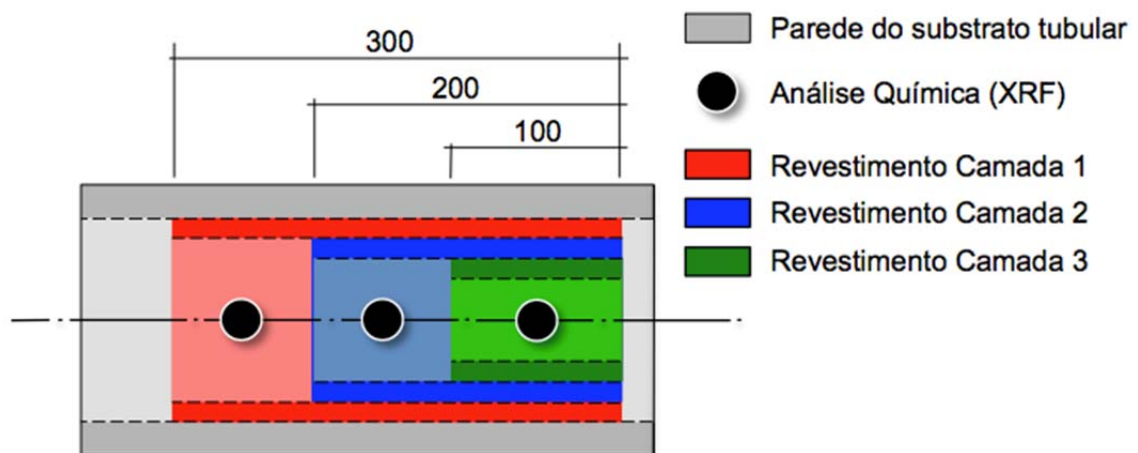
X_s - Teor de ferro do substrato;

X_{c+s} - Teor de ferro do revestimento depositado.

Neste trabalho, o material aço carbono é o primeiro substrato, sendo a primeira camada o novo substrato para a segunda, e a segunda camada o novo substrato para a terceira camada.

Assim, a composição química dos revestimentos processados foi avaliada para a primeira, segunda e terceira camadas, de acordo com o esquema mostrado na FIGURA 5. Para tal, a superfície dos revestimentos foi lixada a fim de remover 0,5 mm e a composição química determinada por espectrometria. Foi utilizado um equipamento portátil marca Oxford, modelo XRF X-MET8000.

FIGURA 5 - ESQUEMA EM CORTE MOSTRANDO A METODOLOGIA UTILIZADA NA AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS REVESTIMENTOS (ESPECTROMETRIA ÓPTICA)



FONTE: O autor (2016)

4.1.3 Quantificação de fração de fases, Software Image J[®]

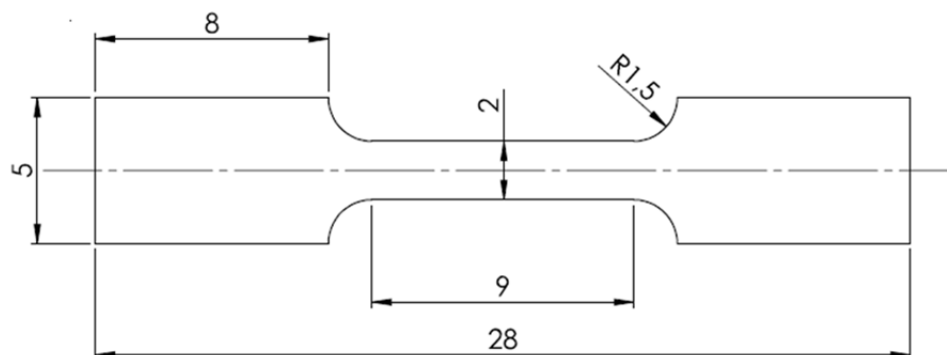
A microestrutura dos revestimentos foi analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na seção transversal dos revestimentos. As microestruturas dos revestimentos obtidas por MEV com o modo de elétrons retroespalhados foram tratadas para acentuar o contraste entre as fases de diferente natureza.

O objetivo da análise de imagens foi quantificar as fases encontradas e analisar os resultados frente aos parâmetros de processamento escolhidos. Neste trabalho, a fração de carbonetos interdendríticos da microestrutura foi medida utilizando o *Software Image J[®]*, a partir dos seguintes passos: 1, *Enhance Contrast / Smooth*; 2, *Set scale*; 3, *8 bytes image*; 4, *Adjust threshold*; 5, *Measure / area fraction*.

4.1.4 Avaliação das Propriedades Mecânicas dos Revestimentos

O efeito das condições de processamento em soldagem sobre as propriedades dos revestimentos foi analisado a partir das propriedades mecânicas em tração, oriundas dos ensaios realizados com os corpos de prova constituídos exclusivamente pelo material resultante dos revestimentos obtidos em cada camada. Foram utilizados corpos de prova para microtração com 0,5 mm de espessura, conforme mostra a FIGURA 6. A metodologia adotada neste trabalho segue uma pesquisa previamente realizada pela *American Welding Society* (AWS) e *Welding Research Council* (WRC) (1999), para determinação de propriedades mecânicas de juntas similares e dissimilares por *Laser Beam* (LB).

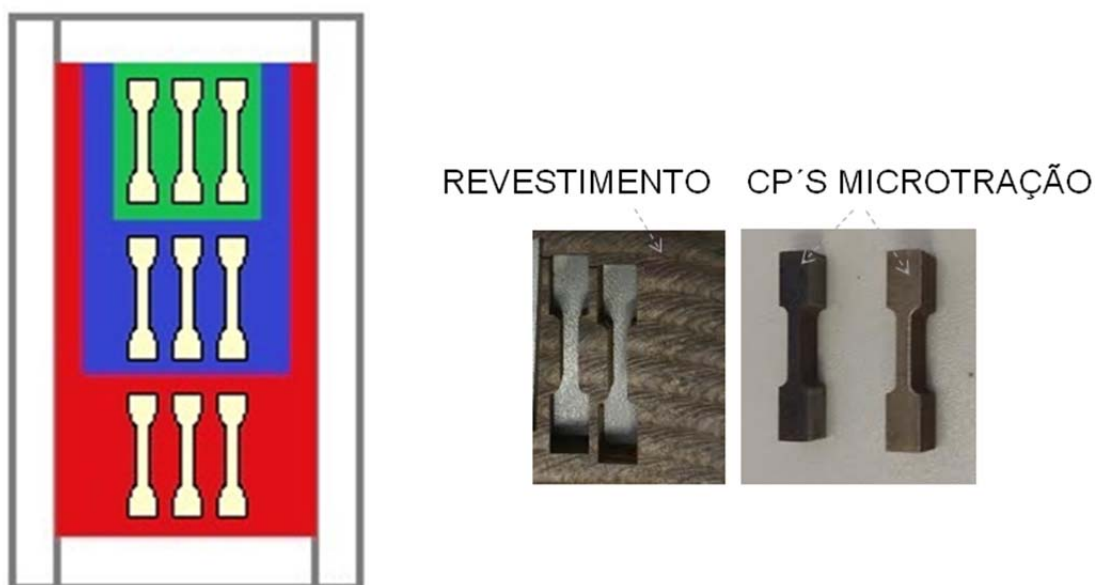
FIGURA 6 - CORPO DE PROVA ADOTADO PARA OS ENSAIOS DE MICROTRAÇÃO (mm)



FONTE: ÇAM et al., (1999)

As propriedades em tração foram determinadas visando avaliar o efeito da diluição sobre as propriedades mecânicas, conforme apresenta esquematicamente a FIGURA 7. A remoção das amostras foi realizada pelo método da eletroerosão na direção longitudinal do tubo revestido, com um espaçamento de 5 mm entre as mesmas.

FIGURA 7 - ESQUEMA MOSTRANDO A RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE MICROTRAÇÃO A PARTIR DE ELETROEROSÃO



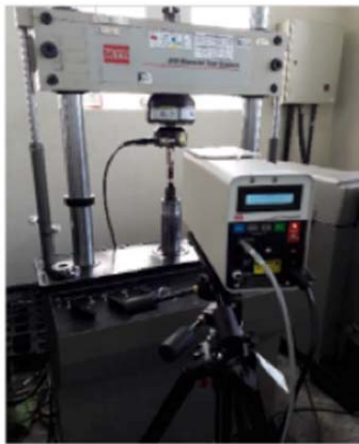
FONTE: O autor (2017)

O ensaio de tração consiste em submeter os corpos de prova a uma carga axial ao longo do comprimento do corpo de prova. Os ensaios foram realizados em uma máquina servo-hidráulica, da marca MTS, modelo 810, com uma célula de carga de 1KN em tração e compressão, os dados gerados durante o ensaio foram coletados e processados no software *MTS TestStar® IIs*. Antes do início do ensaio, os corpos de prova foram submetidos à marcação, por lâmina, do seu comprimento inicial, com auxílio de paquímetros digitais. Foram afixadas fitas refletivas nos locais indicados na marcação do comprimento inicial, de forma que tornasse possível a leitura do alongamento de cada corpo de prova pelo extensômetro a laser. Foi utilizado um extensômetro a laser marca MTS, modelo LX500 acoplado ao ensaio para aquisição dos dados de deformação no corpo de prova. A FIGURA 8 mostra o equipamento utilizado.

A taxa de deslocamento da máquina foi de 0,5 mm/min e a base de medida (L_0) para determinação do alongamento foi de 6 mm. Os corpos de prova, analisados através do ensaio de microtração, tiveram as suas respectivas largura e espessura, medidos com o auxílio de paquímetros digitais, para que fosse possível a obtenção da área útil da seção transversal de cada corpo de prova através do cálculo de área para seções retangulares. Foram determinados o limite de escoamento e o limite de resistência à tração, dividindo a força de escoamento e a força máxima pela área da

seção transversal inicial do corpo de prova. O ensaio foi considerado válido quando a fratura ocorreu dentro da região onde a seção é reduzida, dentro da referência de 6 mm controlada por laser. Foram ensaiados 6 corpos de prova para cada condição estudada.

FIGURA 8 - (A) MÁQUINA MTS COM EXTENSÔMETRO A LASER UTILIZADA PARA ENSAIO DE MICROTRAÇÃO; (B) FIXAÇÃO DO CORPO DE PROVA; (C) FIM DO ENSAIO COM ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA E LEITURA DO DESLOCAMENTO POR LASER



(A)



(B)



(C)

FONTE: O autor (2017)

5 RESULTADOS

Primeiramente são apresentados os resultados da caracterização realizada na chapa laminada da liga Inconel 625 e que serão utilizados como referência para a análise comparativa. Em seguida, a caracterização dos revestimentos depositados é apresentada.

5.1 MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DA LIGA INCONEL 625 LAMINADA

A TABELA 5 apresenta a composição química verificada para a liga Inconel 625 na condição como laminada. As FIGURAS 9 e 10 apresentam a microestrutura da liga de IN625 no estado laminado a quente. Esta condição foi utilizada neste trabalho como referência para a análise microestrutural e de propriedades mecânicas. A microestrutura é composta por grãos equiaxiais de níquel (CFC), contendo pequenos carbonetos dispersos ao longo dos contornos de grão, contendo ainda estruturas de maclas de deformação.

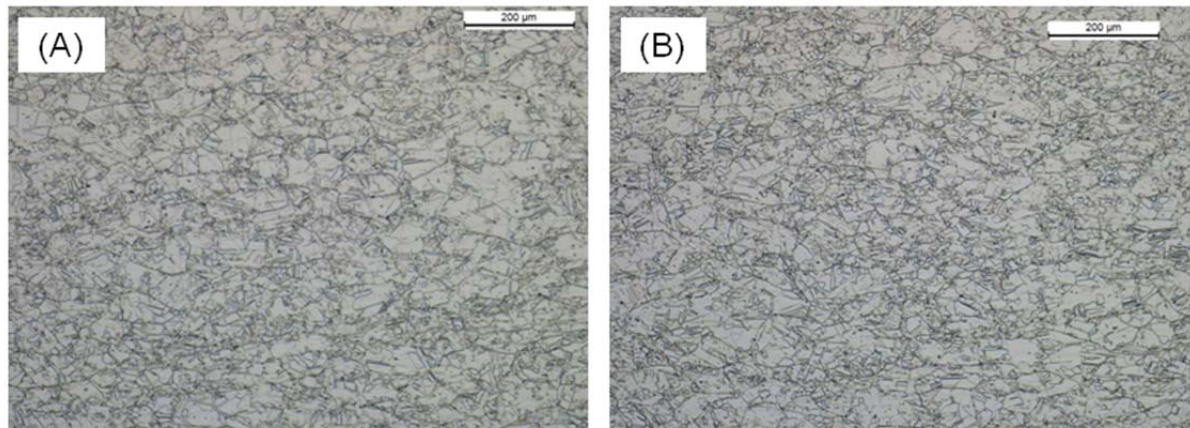
Song e Nakata (2009), relatam em trabalho realizado com chapa de IN625, que carbonetos do tipo MC podem estar dispersos na matriz austenítica ou ainda em contornos de grão na liga laminada. No presente trabalho, os carbonetos na forma de pequenas partículas aparecem concentradas em contorno de grão.

TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CHAPA LAMINADA

COMPOSIÇÃO QUÍMICA VERIFICADA (wt%)					
AMOSTRA	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb
CHAPA	Bal.	21,55	8,83	5,18	3,32

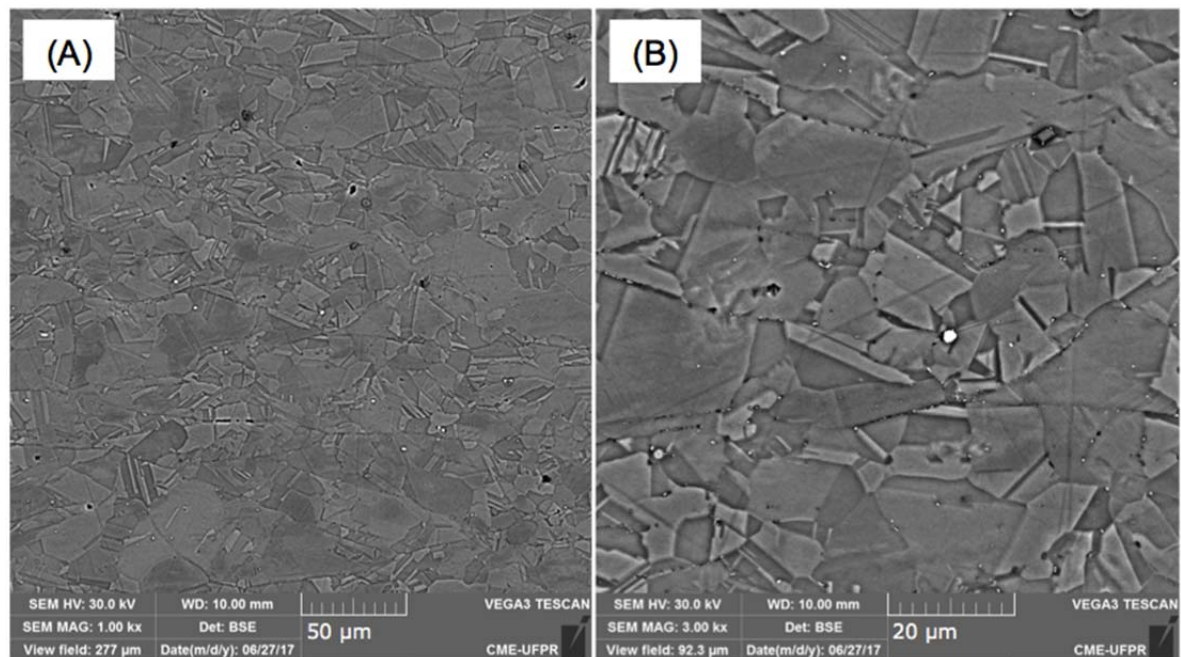
FONTE: O autor (2016)

FIGURA 9 - MICROESTRUTURA TÍPICA DA LIGA IN625 LAMINADA: (A) TRANSVERSAL; (B) LONGITUDINAL. ATAQUE QUIMICO: BEHARA



FONTE: O autor (2017)

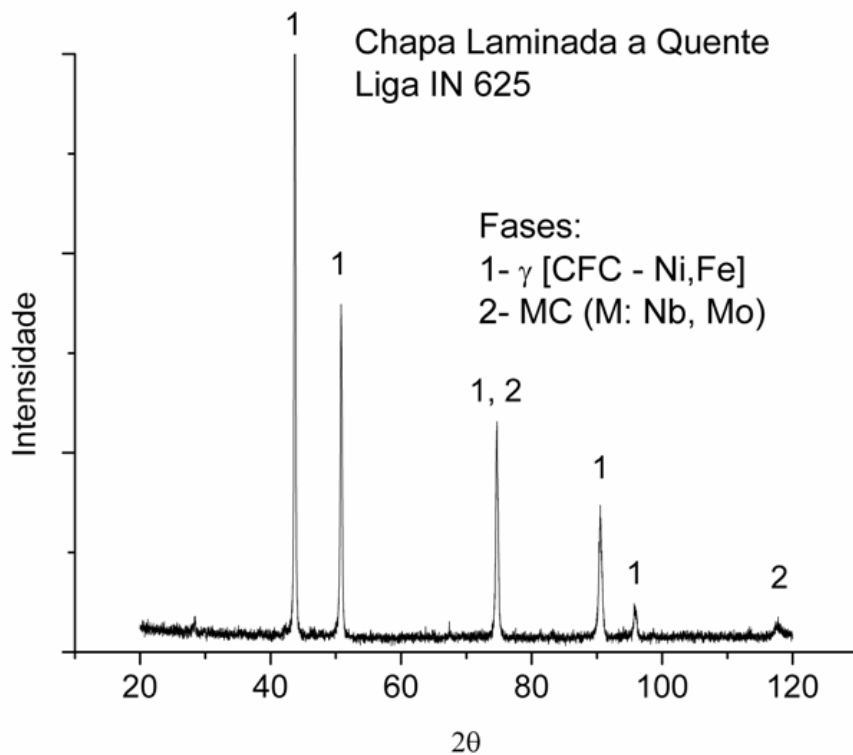
FIGURA 10 - MICROESTRUTURA TÍPICA DA LIGA IN625 LAMINADA: (A) 1000X; (B) 3000X



FONTE: O autor (2017)

A FIGURA 11 apresenta o difratograma de raios X, indicando as principais fases formadas na liga no estado laminado. Os resultados indicaram que a chapa laminada apresenta a fase γ -CFC [Ni, Fe] e pequenos carbonetos ricos em molibdênio e nióbio, do tipo MC (M: Mo, Nb).

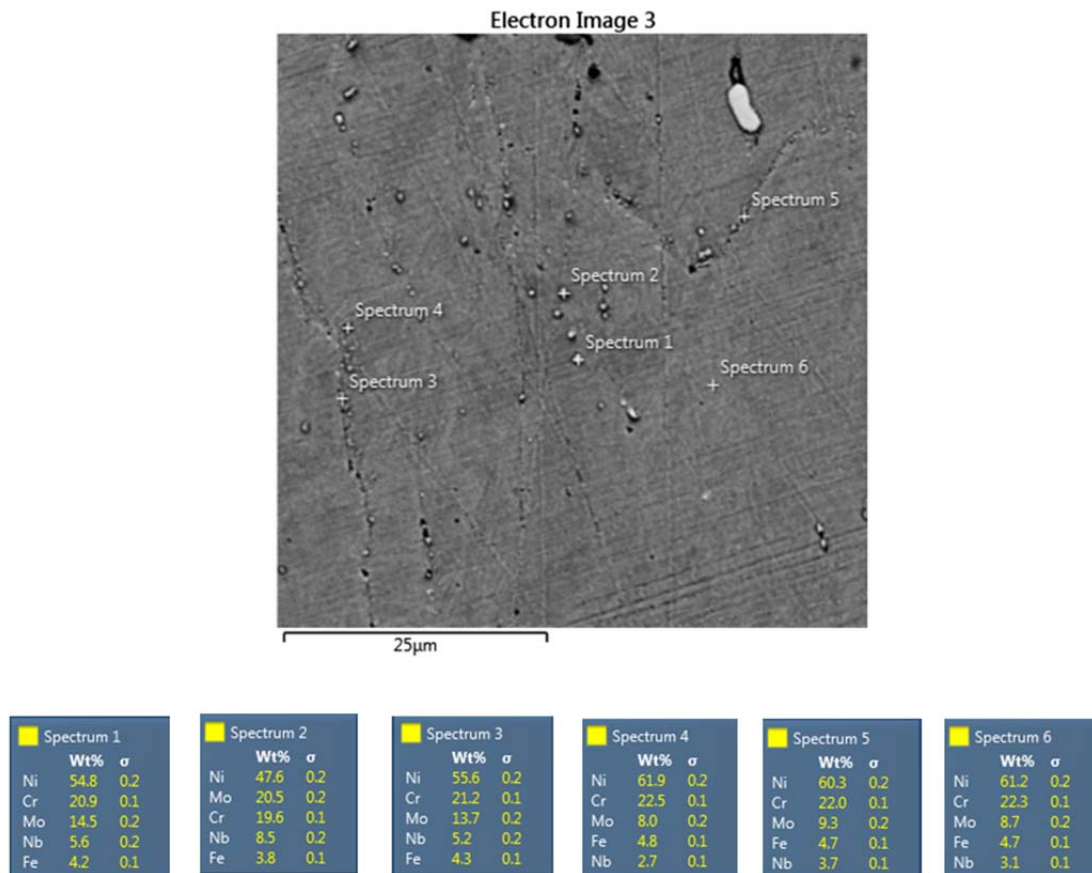
FIGURA 11 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA LIGA IN625 LAMINADA



FONTE: O autor (2017)

Análises complementares de EDS, Espectroscopia por Energia Dispersiva, (FIGURA 12) realizados na microestrutura mostram que a matriz de austenita (Spectrum 6) apresenta uma composição química muito similar à nominal da liga IN625. Por outro lado, os resultados das análises sobre as partículas precipitadas (Spectrum 1 a 3), indicam enriquecimento em Mo e Nb, confirmando os picos relativos a carbonetos encontrados nas análises de difração de raios X.

FIGURA 12 - EDS TÍPICO DAS FASES ENCONTRADAS EM CONTOURO DE GRÃO (SPECTRUM 1-5) E DA MATRIZ (SPECTRUM 6)



FONTE: O autor (2017)

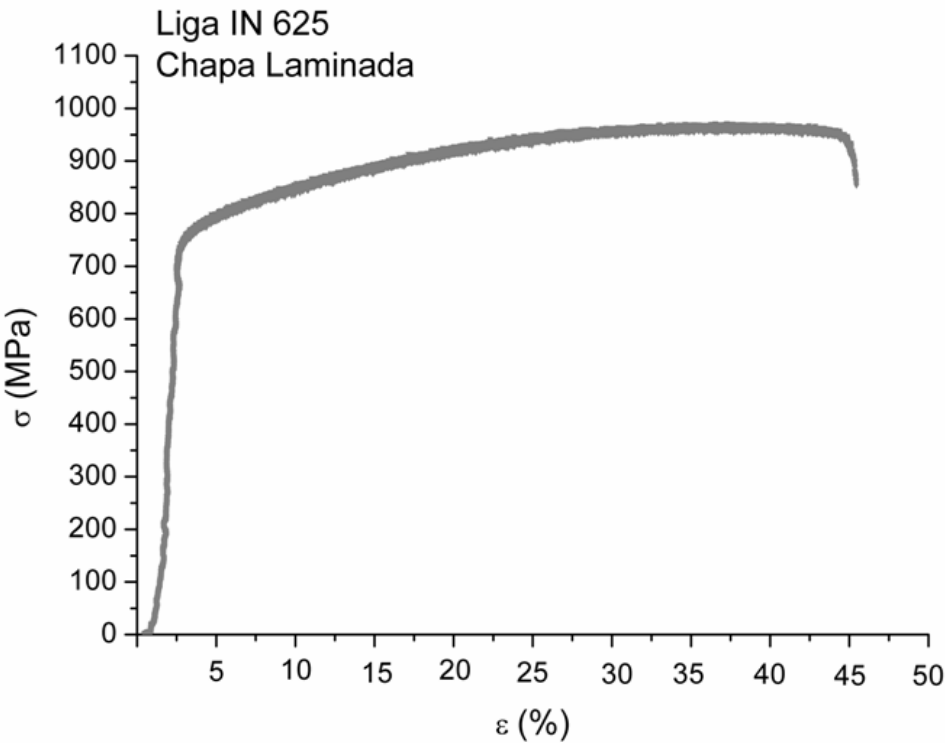
A chapa laminada da liga IN625 foi ainda caracterizada quanto à dureza Vickers e propriedades mecânicas em tração, conforme a TABELA 6 e FIGURA 13. É importante destacar a elevada resistência mecânica e ao escoamento, além de ótima ductilidade da liga na condição como laminada. Song e Nakata (2009), relatam em seu trabalho uma dureza para a liga IN625 (material base) entre 245 e 270 HV. O mesmo autor reporta resistência à tração de 943 MPa e alongamento de 58%. Neste trabalho, verificou-se que tanto a resistência à tração quanto o alongamento medidos foram similares a outros trabalhos acerca da mesma liga na condição laminada. Apesar disso, uma possível justificativa para as diferenças observadas pode estar relacionada ao histórico termomecânico das chapas estudadas.

TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA INCONEL 625 NO ESTADO COMO LAMINADO

PROPRIEDADES MECÂNICAS							
AMOSTRA	Dureza HV _{0,5}	σ_{YS}	Desvio Padrão	σ_{UTS}	Desvio Padrão	A (%)	Desvio Padrão
CHAPA	275	760	43	960	52	47	5

FONTE: O autor (2017)

FIGURA 13 - CURVA TÍPICA TENSÃO *VERSUS* DEFORMAÇÃO PARA A LIGA IN625 LAMINADA



FONTE: O autor (2017)

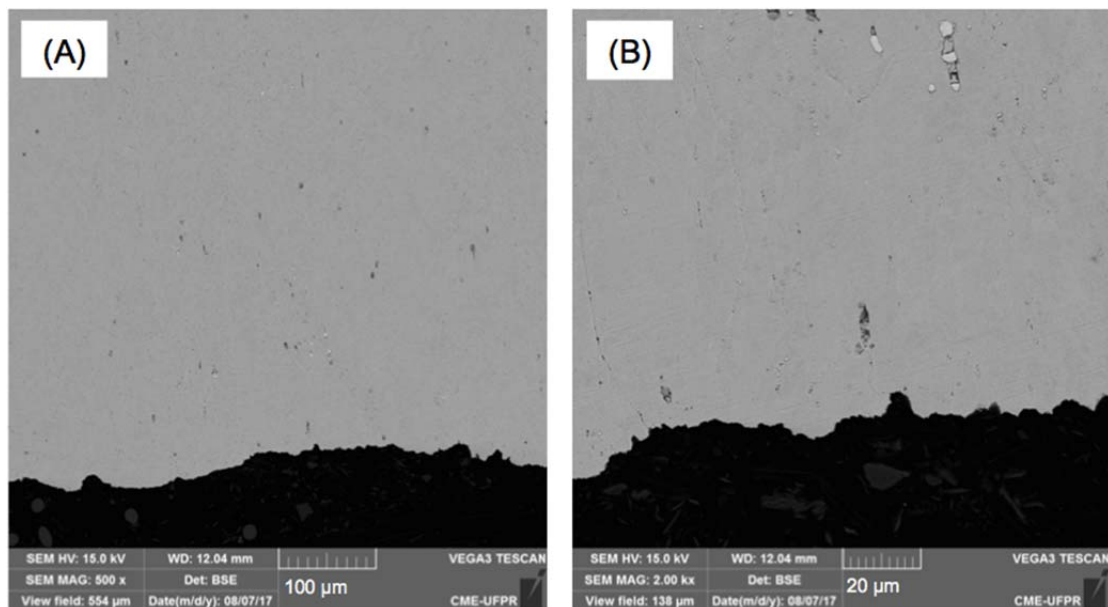
As FIGURAS 14 e 15 apresentam a caracterização realizada após ensaios na região de fratura dos corpos de prova de microtração.

FIGURA 14 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO CHAPA LAMINADA



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 15 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO CHAPA LAMINADA NA REGIÃO DE FRATURA: (A) 500X; (B) 2000X



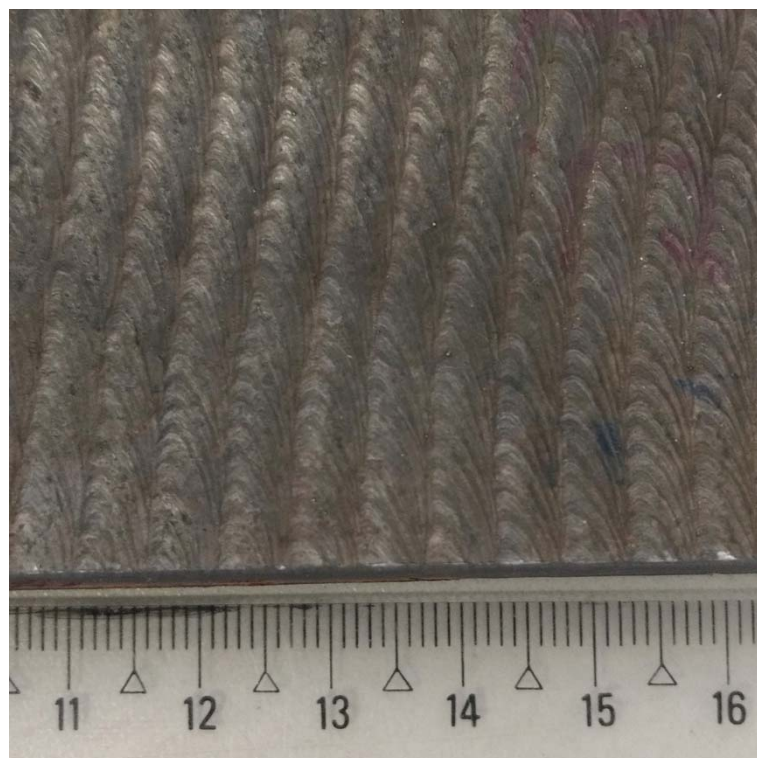
FONTE: O autor (2017)

5.2 ASPECTO SUPERFICIAL, DEFEITOS E DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS

A FIGURA 16 apresenta uma imagem típica da superfície dos revestimentos depositados, revelando a ausência de defeitos e trincas e boa qualidade da superfície, seguindo o que relatam trabalhos anteriores sobre a facilidade de processamento das ligas de níquel (ABIOYE; MCCARTNEY; CLARE, 2015; ANTOSZCZYSZYN, 2014; FERREIRA; GRAF; SCHEID, 2015).

A TABELA 7 apresenta a composição química dos revestimentos verificada por espectrometria. A FIGURA 17 apresenta as macrografias dos revestimentos em seção transversal.

FIGURA 16 - IMAGEM TÍPICA DA SUPERFÍCIE DOS REVESTIMENTOS PROCESSADOS NA PAREDE INTERNA DO TUBO PARA ESTE TRABALHO



FONTE: O autor (2017)

TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR GTAW.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA VERIFICADA (wt%)					
CAMADA	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb
#1	Bal.	16,83	6,47	26,43	2,58
#2	Bal.	20,57	8,31	7,05	3,33
#3	Bal.	21,35	8,69	2,66	3,49

FONTE: O autor (2017)

FIGURA 17 - MACROGRAFIA EM SEÇÃO TRANSVERSAL DOS REVESTIMENTOS

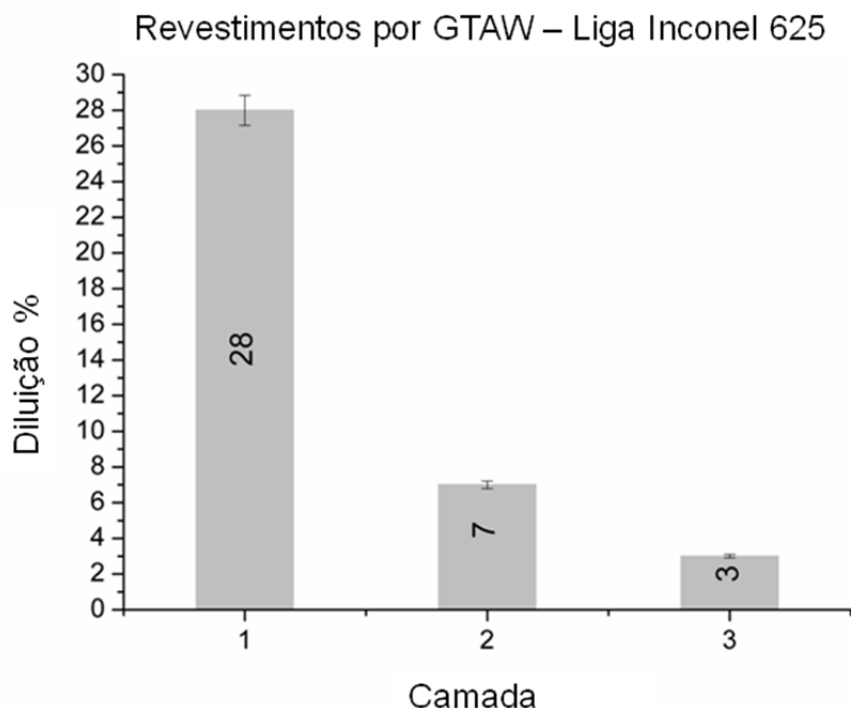


FONTE: O autor (2017)

A diluição foi calculada considerando-se os teores de ferro conforme indicados abaixo, os resultados estão apresentados na FIGURA 18:

- a) teor de ferro verificado nos revestimentos, mostrados na TABELA 7;
- b) teor de ferro do material de adição (arame de soldagem) (0,28 wt%);
- c) teor de ferro do aço carbono utilizado como substrato (99,02 wt%).

FIGURA 18 - DILUIÇÃO ENCONTRADA NAS CAMADAS 1, 2 E 3



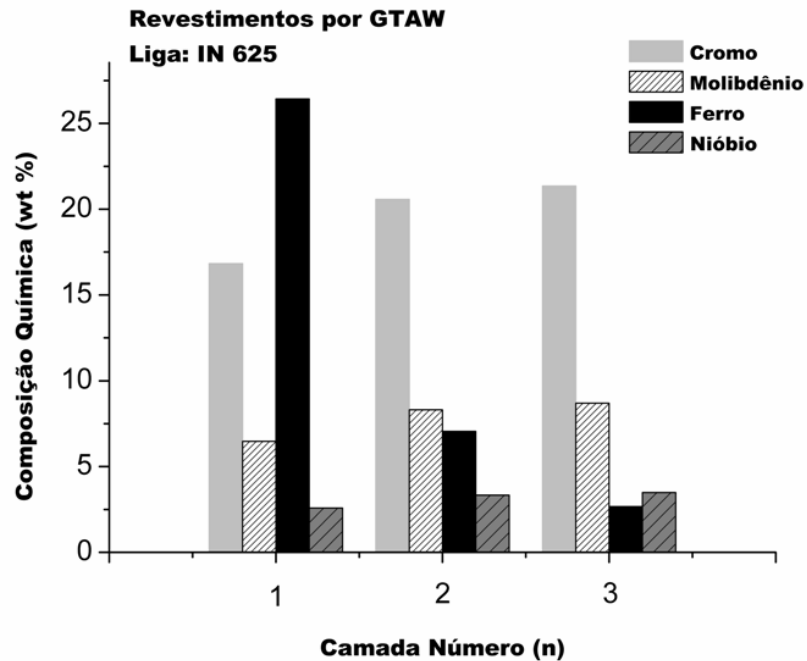
FONTE: O autor (2017)

Para os revestimentos estudados neste trabalho, é agora claro o efeito da redução da diluição à medida que uma nova camada de revestimento é depositada. Isto é, particularmente, o compartilhamento da composição química da camada anterior na composição química da camada que está sendo depositada. Considerando a diluição de 28% observada para a primeira camada, a redução observada para a segunda e terceira camada seguiu a tendência de diluição observada na primeira camada de revestimento. Verificou-se que a diluição foi reduzida em 30% da primeira na segunda camada e em cerca de 50% da segunda para a terceira camada.

Adicionalmente, a deposição da liga IN625 sobre aço carbono AISI 1020 indicou importante recuperação no teor de cromo para a segunda e terceira camadas. Isso contribui, potencialmente, para a obtenção de boas propriedades frente à corrosão e também quanto ao comportamento mecânico, conforme discutido anteriormente acerca do efeito dos elementos de liga nas características deste sistema de liga. Não menos importante foi a elevação no teor final de molibdênio e nióbio na composição das camadas, elementos que promovem endurecimento por

solução sólida. A FIGURA 19 apresenta de forma gráfica a variação dos principais elementos na composição dos revestimentos (níquel é o balanço para 100%).

FIGURA 19 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA VERIFICADA

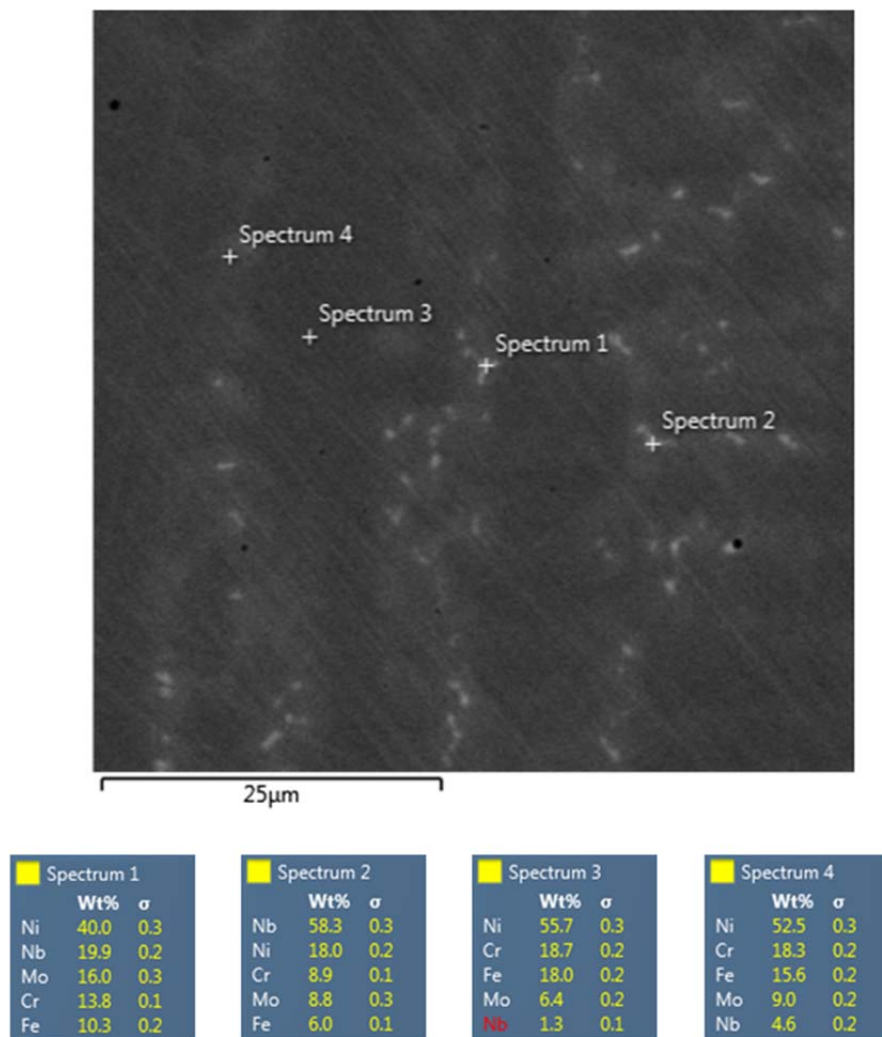


FONTE: O autor (2017)

5.3 MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS

A FIGURA 20 apresenta a análise pontual típica obtida por EDS realizada na microestrutura dos revestimentos soldados. Os resultados indicam um maior teor dos elementos molibdênio e nióbio nas regiões interdendríticas, enquanto estes elementos apresentam valores mais baixos que a composição nominal da liga nas regiões dendríticas de austenita (γ (Ni-CFC)). Esta análise reforça a ocorrência de segregação de elementos durante a solidificação dos revestimentos depositados.

FIGURA 20 - EDS TÍPICO REALIZADO NAS FASES ENCONTRADAS DOS REVESTIMENTOS: SPECTRUM 1 E 2 – CARBONETOS; SPECTRUM 3 - DENDRITAS DE NI-CFC; SPECTRUM 4 - REGIÃO INTERDENDRÍTICA

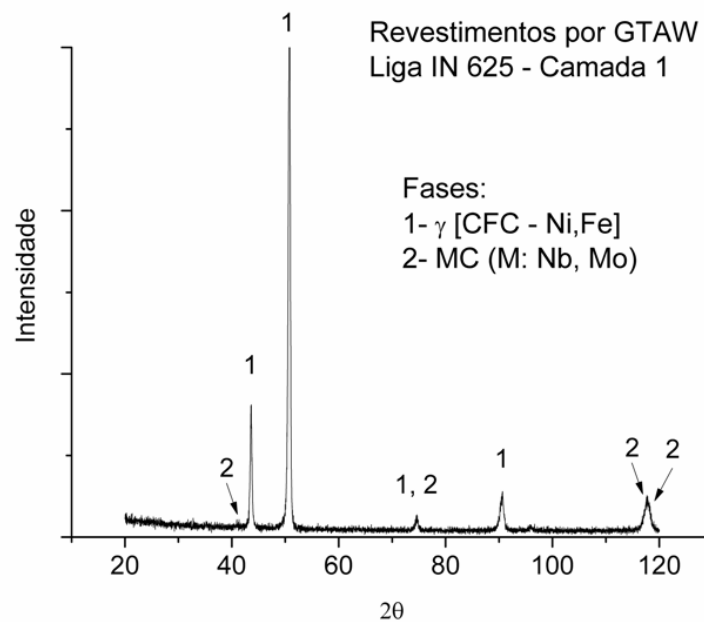


FONTE: O autor (2017)

As FIGURAS 21 a 29 mostram os resultados das análises de difração de raios X e também análises de EDS em uma linha sobre a microestrutura dos revestimentos depositados na forma de 1, 2 e 3 camadas de revestimento. É importante destacar primeiramente que a natureza das fases formadas (tipo) nos revestimentos soldados não se altera com a diluição e processo de fabricação. No mesmo sentido, as análises em linha mostram claramente que o processo de segregação leva à partição de elementos. Assim, molibdênio e nióbio segregam e ficam concentrados nas regiões interdendríticas, levando à formação de carbonetos do tipo MC (M: Mo, Nb). É importante destacar que os resultados das análises em linha são apresentados na forma gráfica para molibdênio e nióbio (que enriquecem

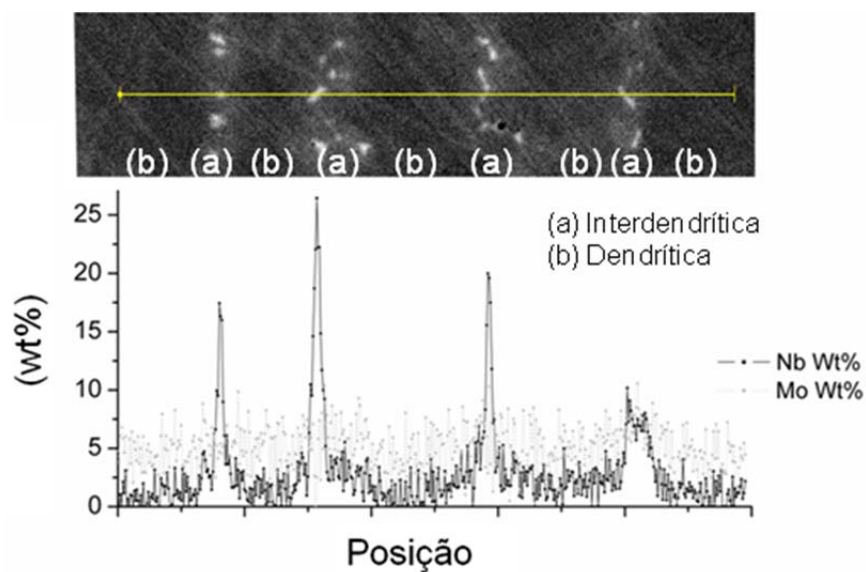
nas regiões interdendríticas) e, em seguida para níquel, cromo e ferro, que estão empobrecidos nestas regiões que apresentam um maior teor de Mo e Nb.

FIGURA 21 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA LIGA IN625, CAMADA 1



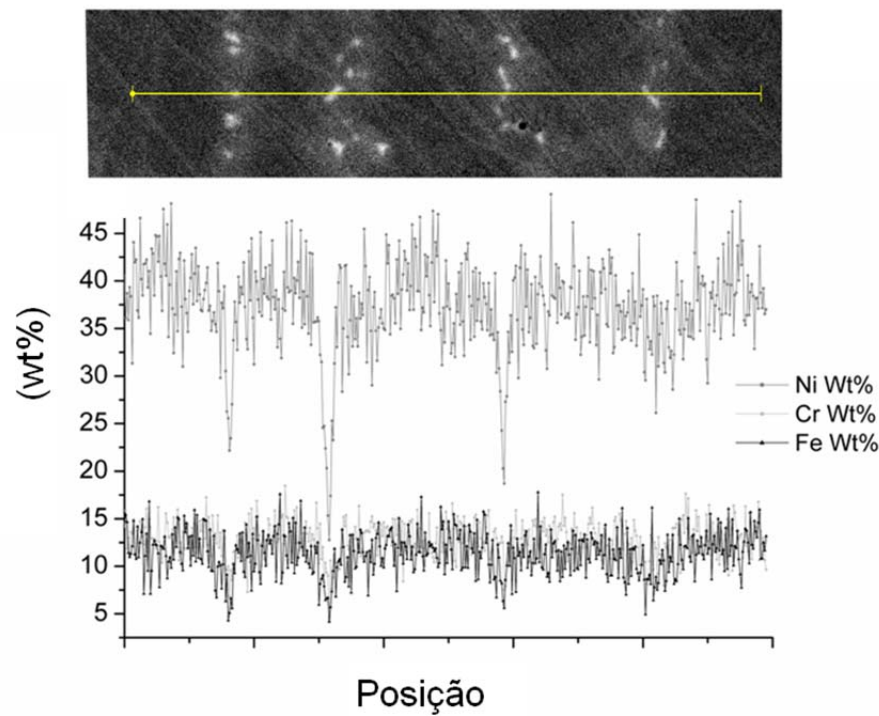
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 22 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 1: Mo, Nb



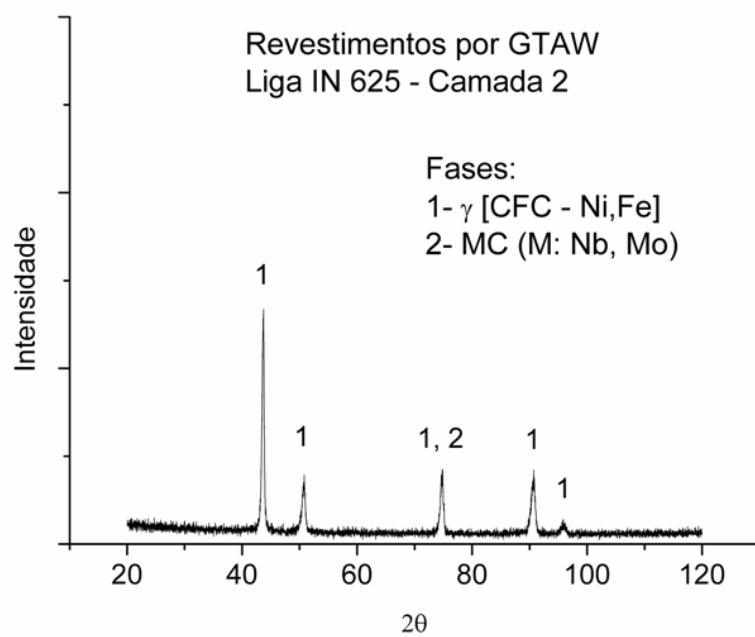
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 23 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 1: Ni, Cr, Fe



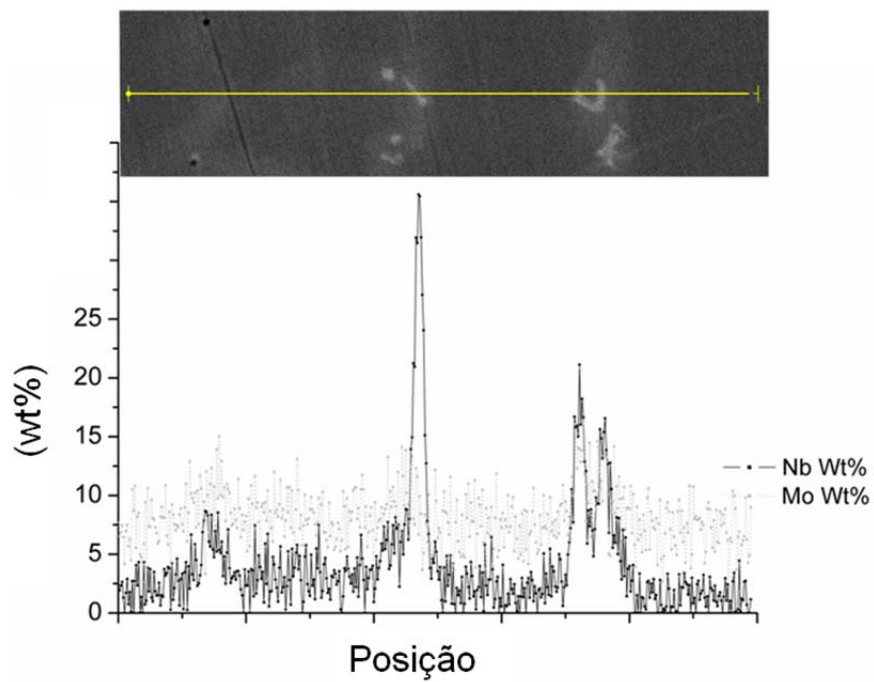
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 24 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA LIGA IN625, CAMADA 2



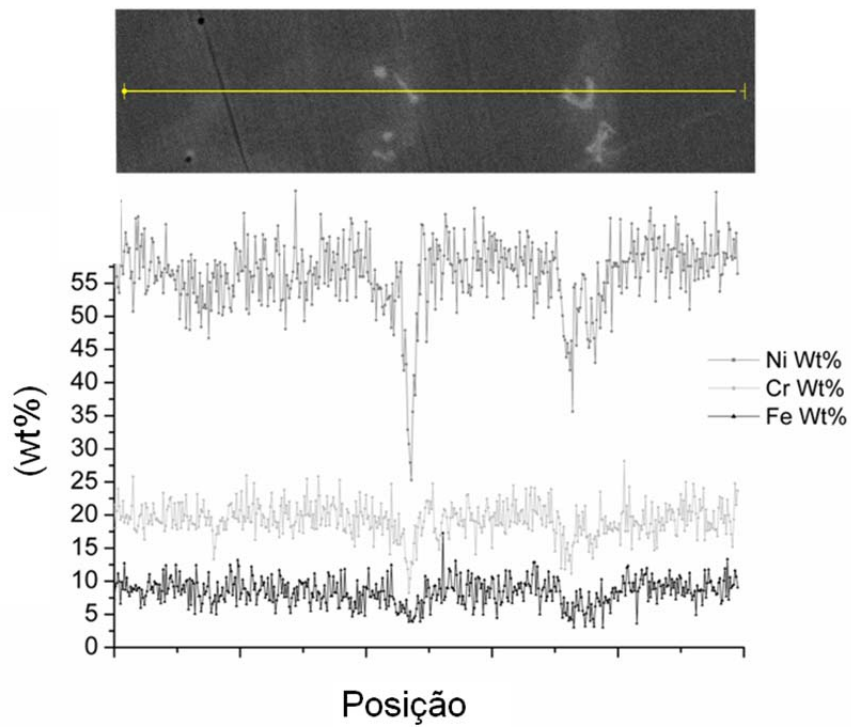
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 25 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 2: Mo, Nb



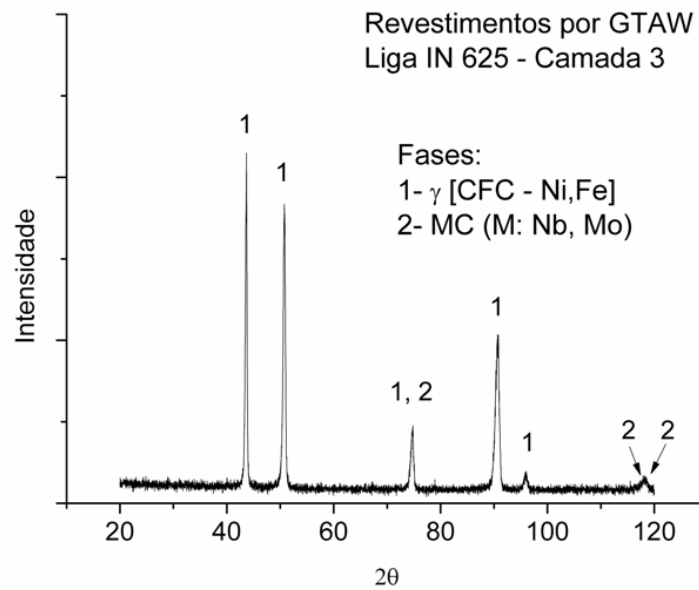
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 26 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 2: Ni, Cr, Fe



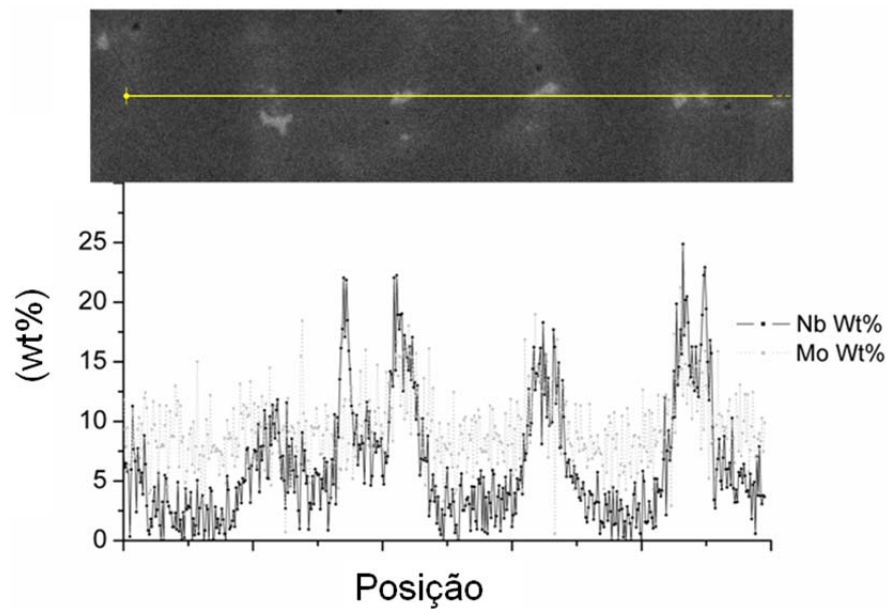
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 27 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA LIGA IN625, CAMADA 3



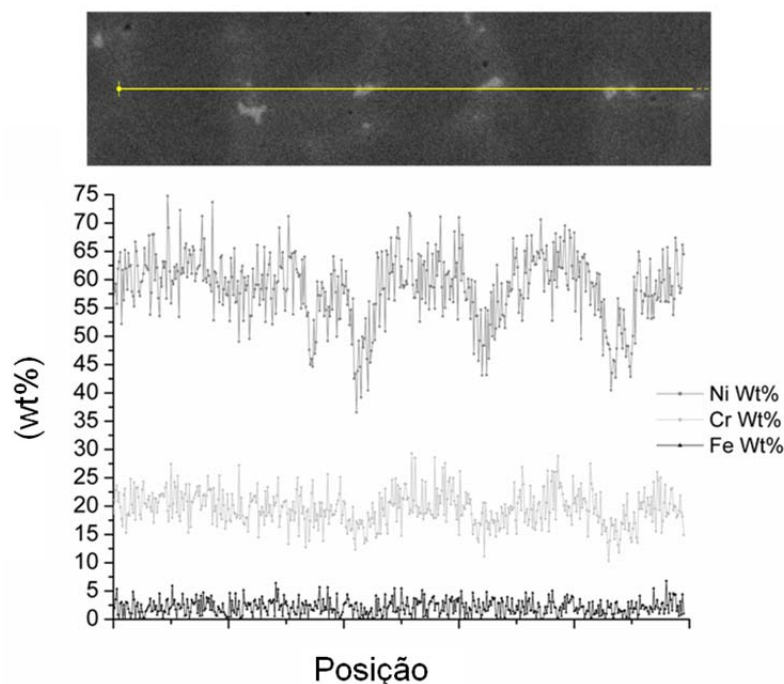
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 28 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 3: Mo, Nb



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 29 - MAPEAMENTO DE EDS TÍPICO REALIZADO NA MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SOLDADOS. CAMADA 3: Ni, Cr, Fe

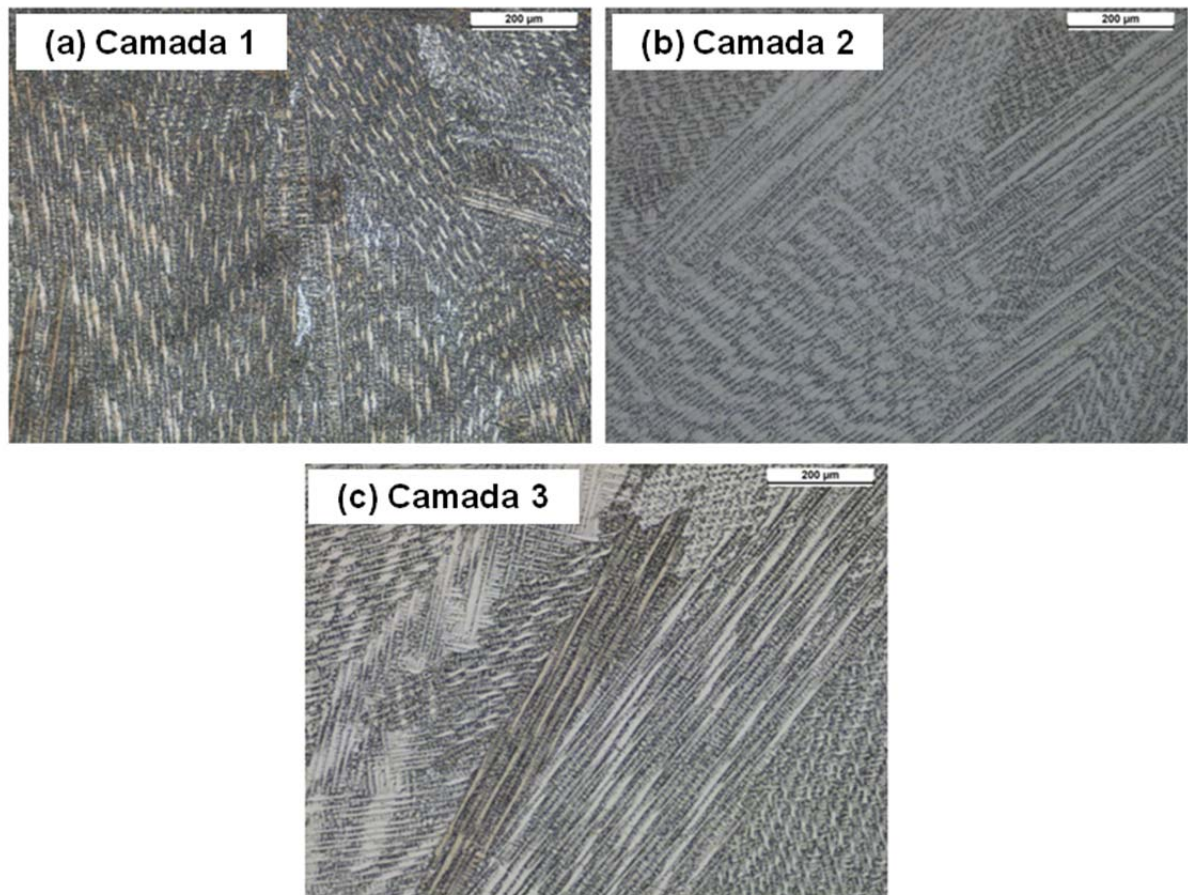


FONTE: O autor (2017)

A partir das análises realizadas (DRX e EDS) e conforme relatado por Antoszczyszyn (2014), os revestimentos de liga IN625 exibem estrutura dendrítica de níquel (CFC) e os elementos molibdênio e nióbio se concentram nas regiões interdendríticas, formando carbonetos do tipo MC (M: Mo; Nb). Fernandes et al. (2011), relatou a segregação de molibdênio interdendríticamente em estudo acerca da produção de revestimentos soldados.

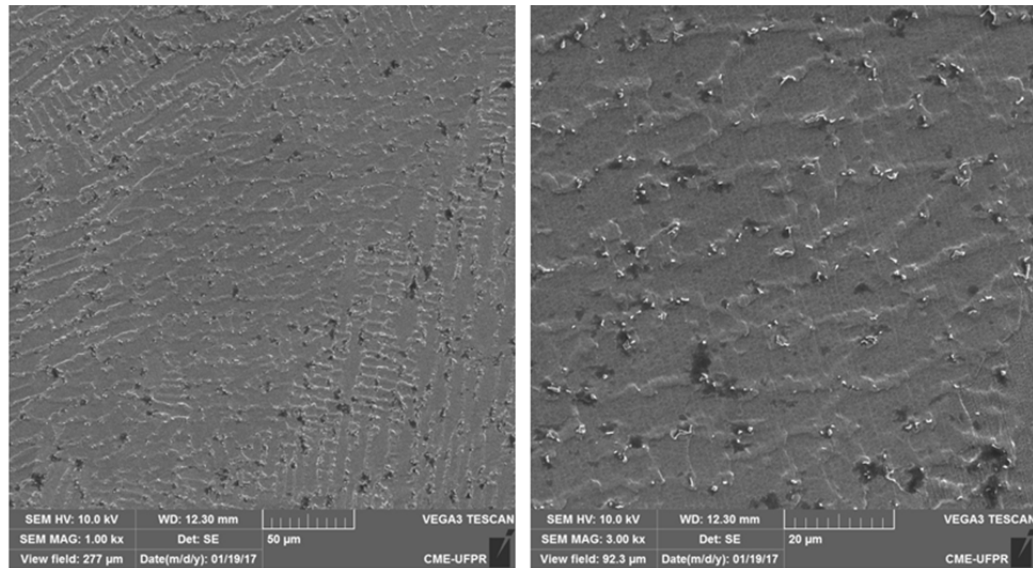
A FIGURA 30 mostra a microestrutura típica dos revestimentos depositados na forma de 1, 2 e 3 camadas. As FIGURAS 31 a 36 mostram o impacto do processamento na forma de multicamadas sobre a fração de carbonetos formados nos revestimentos. Estes resultados, juntamente com a análise realizada acerca da composição química, visam dar suporte à discussão das propriedades finais desenvolvidas nas diversas condições. Para tal, juntamente com a micrografia, são apresentadas as frações de carbonetos interdendríticos formados. As imagens foram obtidas por MEV e tratadas mostrando os carbonetos, bem como sua quantificação foi realizada com auxílio do software *Image J*[®].

FIGURA 30 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) FORMADA NAS CAMADAS DOS REVESTIMENTOS (MICROSCÓPIO ÓPTICO). ATAQUE QUÍMICO: BEHARA



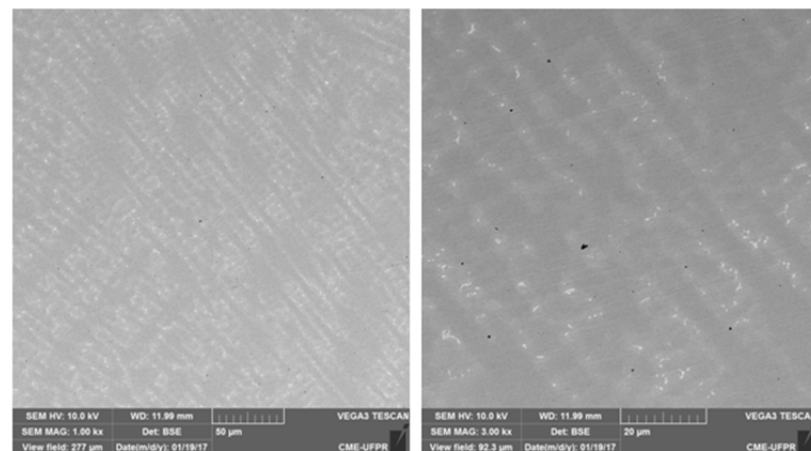
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 31 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 1. ATAQUE ELETROLÍTICO: ÁCIDO OXÁLICO SATURADO (3V)

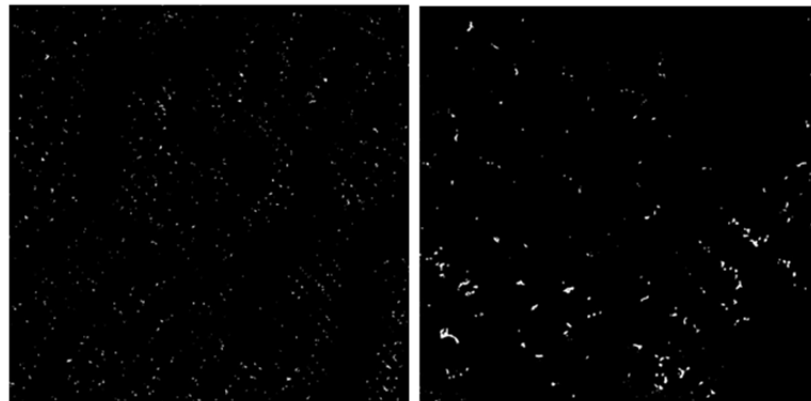


FONTE: O autor (2017)

FIGURA 32 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 1. A IMAGEM INFERIOR TRATADA MOSTRA OS CARBONETOS

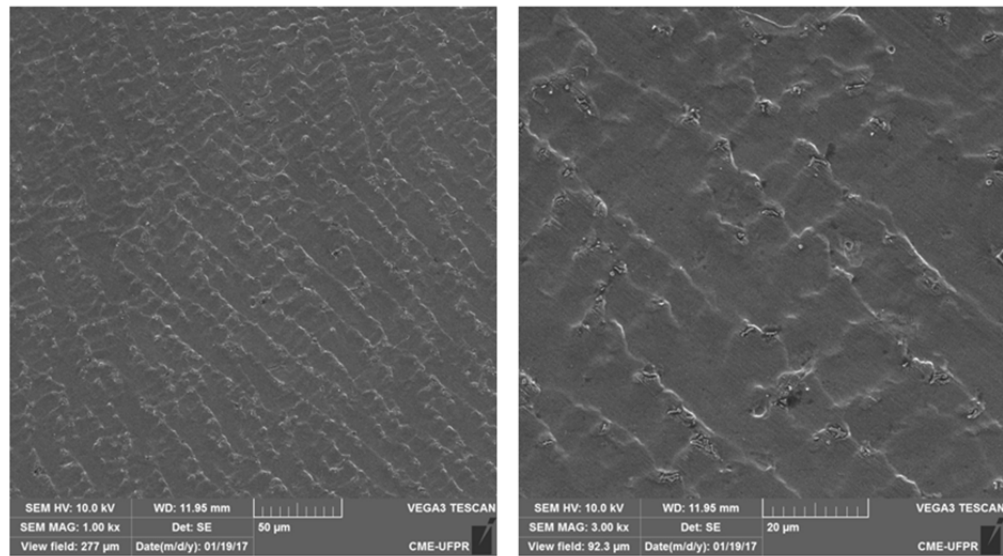


GTW C1 – FRAÇÃO CARBONETOS – 0,60 – 0,70%



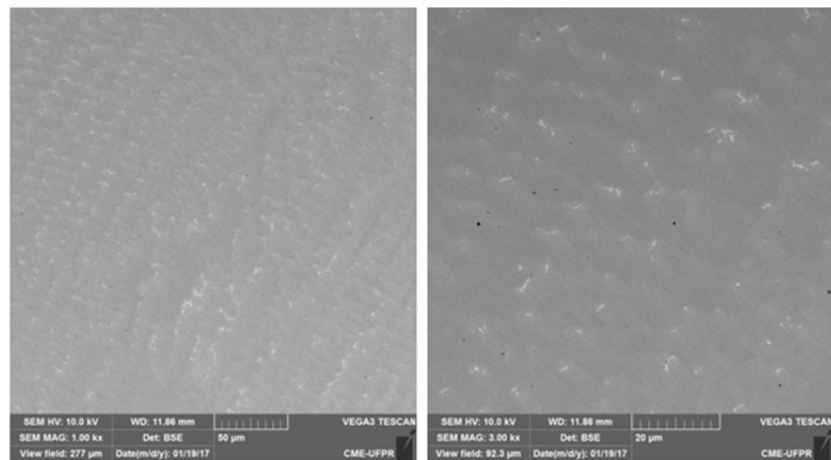
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 33 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 2. ATAQUE ELETROLÍTICO: ÁCIDO OXÁLICO SATURADO (3V)

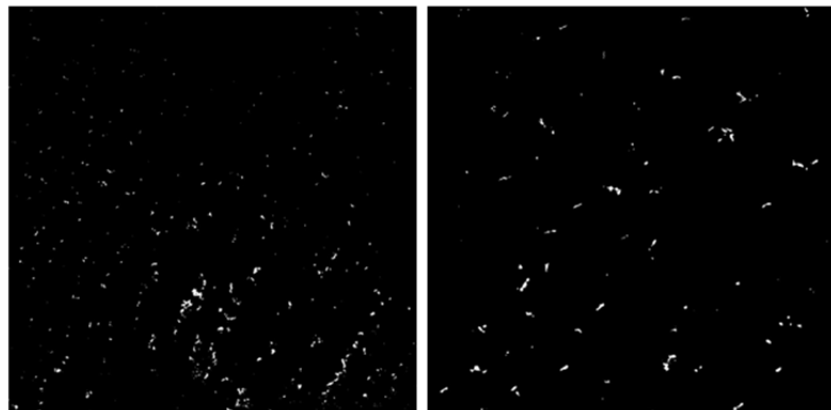


FONTE: O autor (2017)

FIGURA 34 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 2. A IMAGEM INFERIOR TRATADA MOSTRA OS CARBONETOS

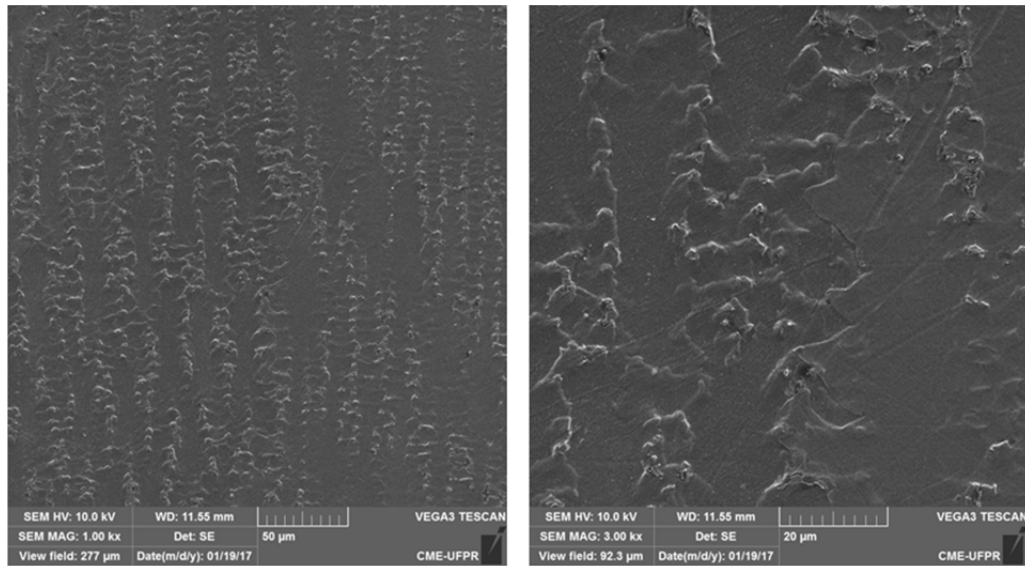


GTW C2 – FRAÇÃO CARBONETOS – 0,44 – 0,58%



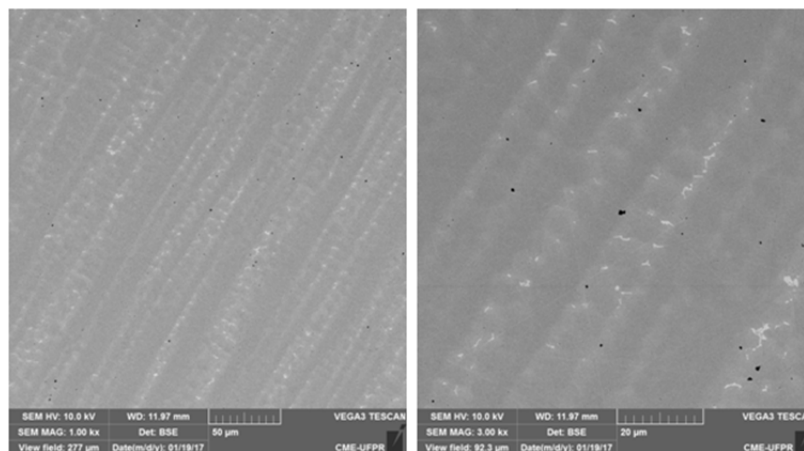
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 35 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 3. ATAQUE ELETROLÍTICO: ÁCIDO OXÁLICO SATURADO (3V)

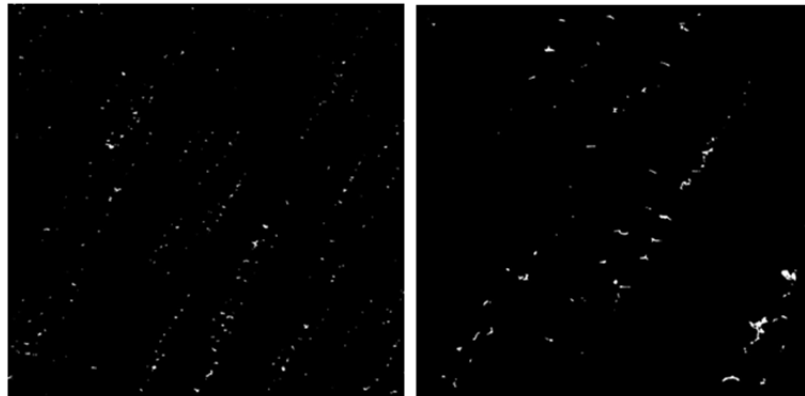


FONTE: O autor (2017)

FIGURA 36 - MICROESTRUTURA TÍPICA DENDRÍTICA DE NÍQUEL (CFC) DO REVESTIMENTO DEPOSITADO PARA A CAMADA 3. A IMAGEM INFERIOR TRATADA MOSTRA OS CARBONETOS



GTW C3 – FRAÇÃO CARBONETOS – 0,35 – 0,42%

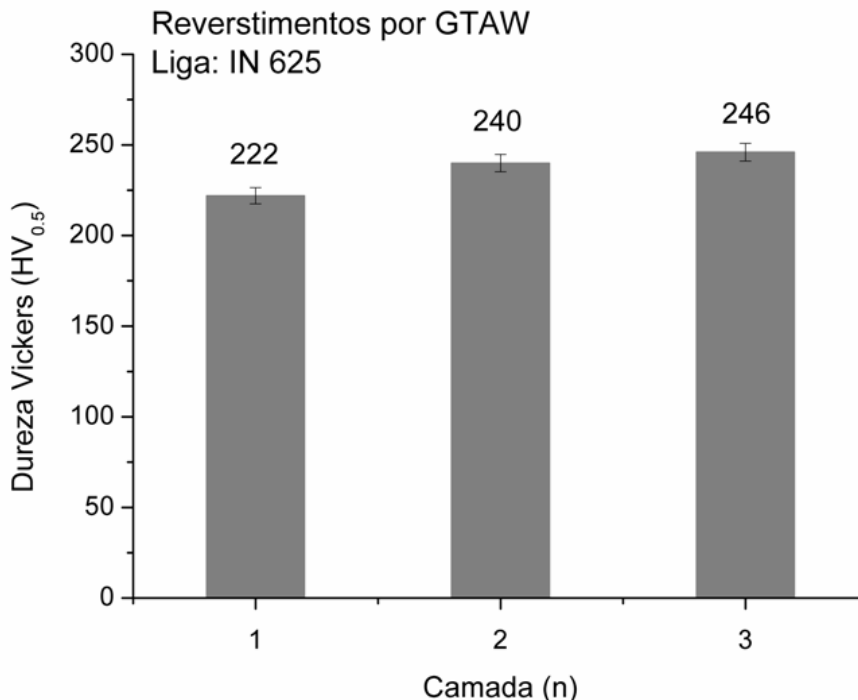


FONTE: O autor (2017)

5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS REVESTIMENTOS

A FIGURA 37 mostra o efeito da deposição de uma nova camada de IN625 sobre a dureza dos revestimentos. A composição química (TABELA 3) indicou uma variação significativa no teor de ferro e elementos de liga, especialmente quando comparados à primeira camada depositada. Neste caso, a maior dureza apresentada para as camadas 2 e 3 pode ser compreendida como um efeito direto da diluição, apresentando um maior teor de elementos de liga em solução sólida. Os resultados seguiram a tendência observada em trabalhos anteriores que estudaram a produção de revestimentos de ligas de níquel a partir de cordões únicos (ANTOSZCZYSZYN, 2014; FERREIRA; GRAF; SCHEID, 2015), considerando o efeito da introdução de ferro, que ocorre em decorrência da diluição ou interação com o substrato.

FIGURA 37 - DUREZA DOS REVESTIMENTOS NAS CAMADAS 1, 2, 3



FONTE: O autor (2017)

A TABELA 8 e FIGURA 38 mostra os resultados típicos dos ensaios de microtração realizados para os revestimentos. Considerando os resultados

apresentados com relação às soluções sólidas (composição química) e à fração de carbonetos caracterizados anteriormente, as propriedades mecânicas devem também ser afetadas.

Verificou-se que a adição de ferro leva à redução no limite de escoamento e de resistência a tração. Por outro lado, ao que tudo indica, a introdução de carbono leva a uma maior fração de carbonetos, que está relacionado à redução na ductilidade dos revestimentos. As FIGURAS 39 a 41 mostram as macrografias dos corpos de prova de microtração. É importante destacar que, na região de fratura (onde a deformação está concentrada), verifica-se nitidamente uma redução da seção dos corpos de prova, reforçando a boa ductilidade apresentada nos resultados de alongamento. Yeni e Koçak (2005) encontraram valores de limite de escoamento de 481 MPa e limite de tração de 858 MPa, com alongamento de 44% para revestimentos obtidos a laser na zona fundida (soldagem de união) o que mostra uma grande coerência com os valores encontrados para a Camada 3 processada na forma de revestimentos neste trabalho. É interessante observar que, como a soldagem de união foi realizada em chapas de mesma composição nominal da liga de adição, a diluição não altera a composição do metal de solda, reforçando a coerência dos resultados deste trabalho.

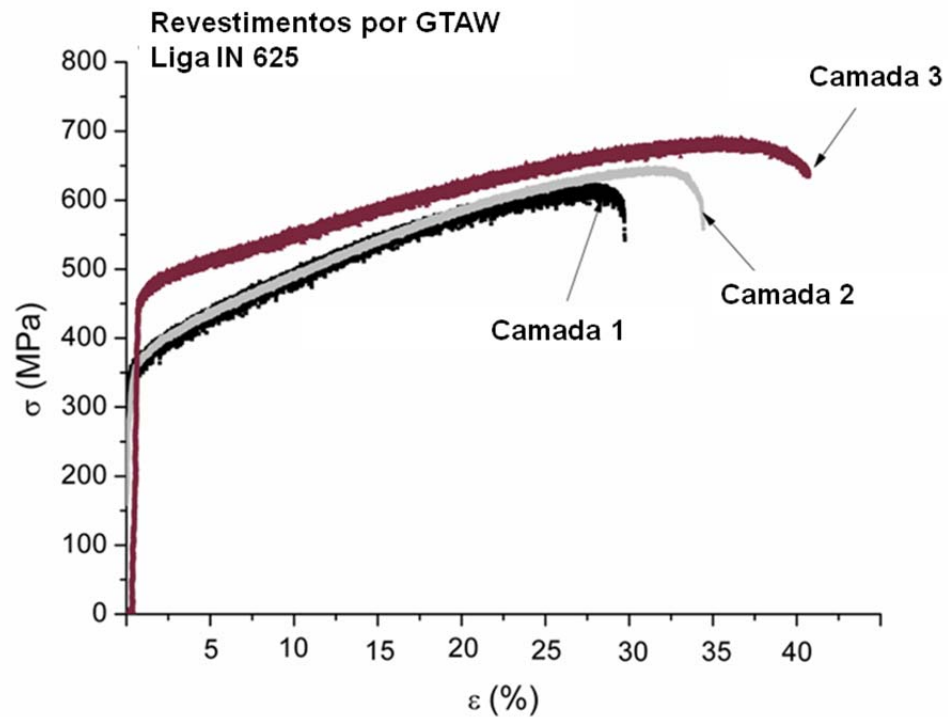
Finalmente, a caracterização da superfície de fratura dos corpos de prova de microtração foi realizada, a fim de descrever o micromecanismo de fratura e investigar eventuais defeitos de soldagem que possam estar associados à fratura dos corpos de prova, apresentado nas FIGURAS 42 a 44.

TABELA 8 - VALORES MÉDIOS PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS REVESTIMENTOS DE LIGA INCONEL 625

PROPRIEDADES MECÂNICAS							
CAMADA	DUREZA HV _{0,5}	σ_{YS} (MPa)	DESVIO PADRÃO	σ_{UTS} (MPa)	DESVIO PADRÃO	ϵ (%)	DESVIO PADRÃO
# 1	222	380	43	620	41	29	5
# 2	240	410	30	660	32	35	3
# 3	246	480	27	680	35	38	4

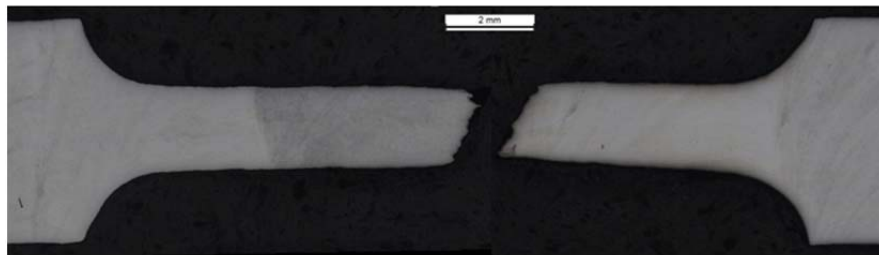
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 38 - CURVAS TÍPICAS EM TRAÇÃO PARA OS REVESTIMENTOS



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 39 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 1



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 40 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 2



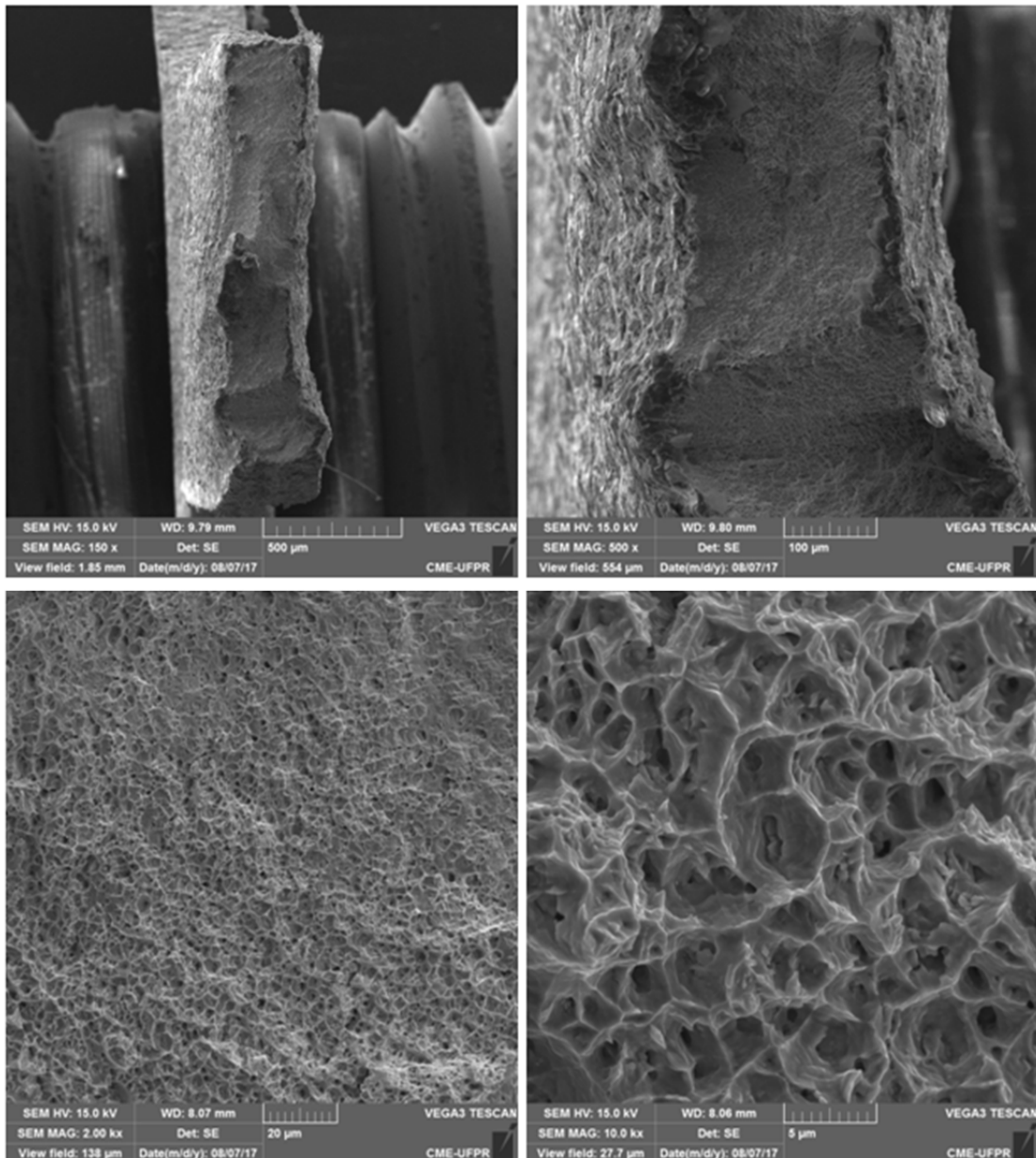
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 41 - MACROGRAFIA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 3



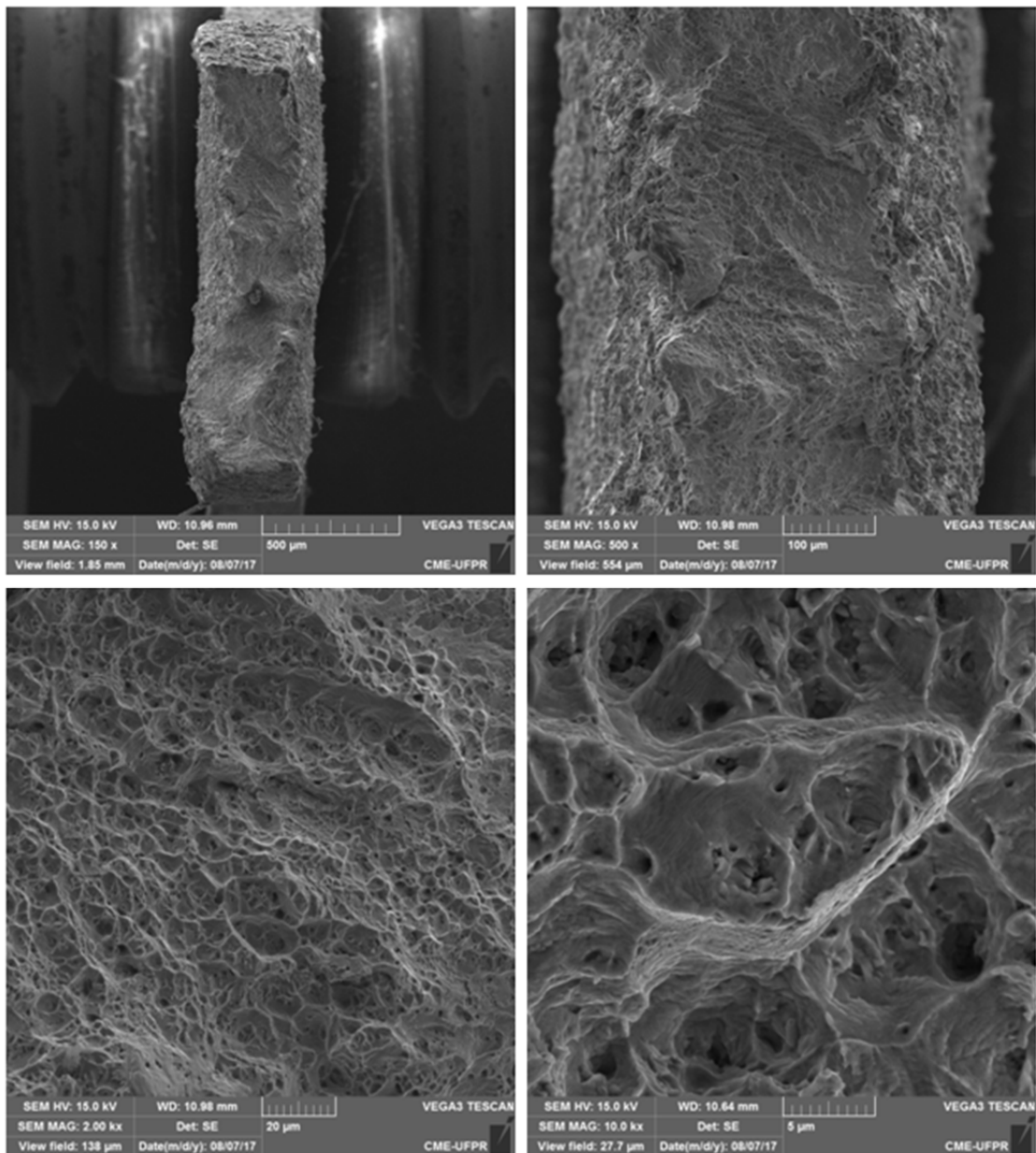
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 42 - SUPERFÍCIE DE FRATURA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 1



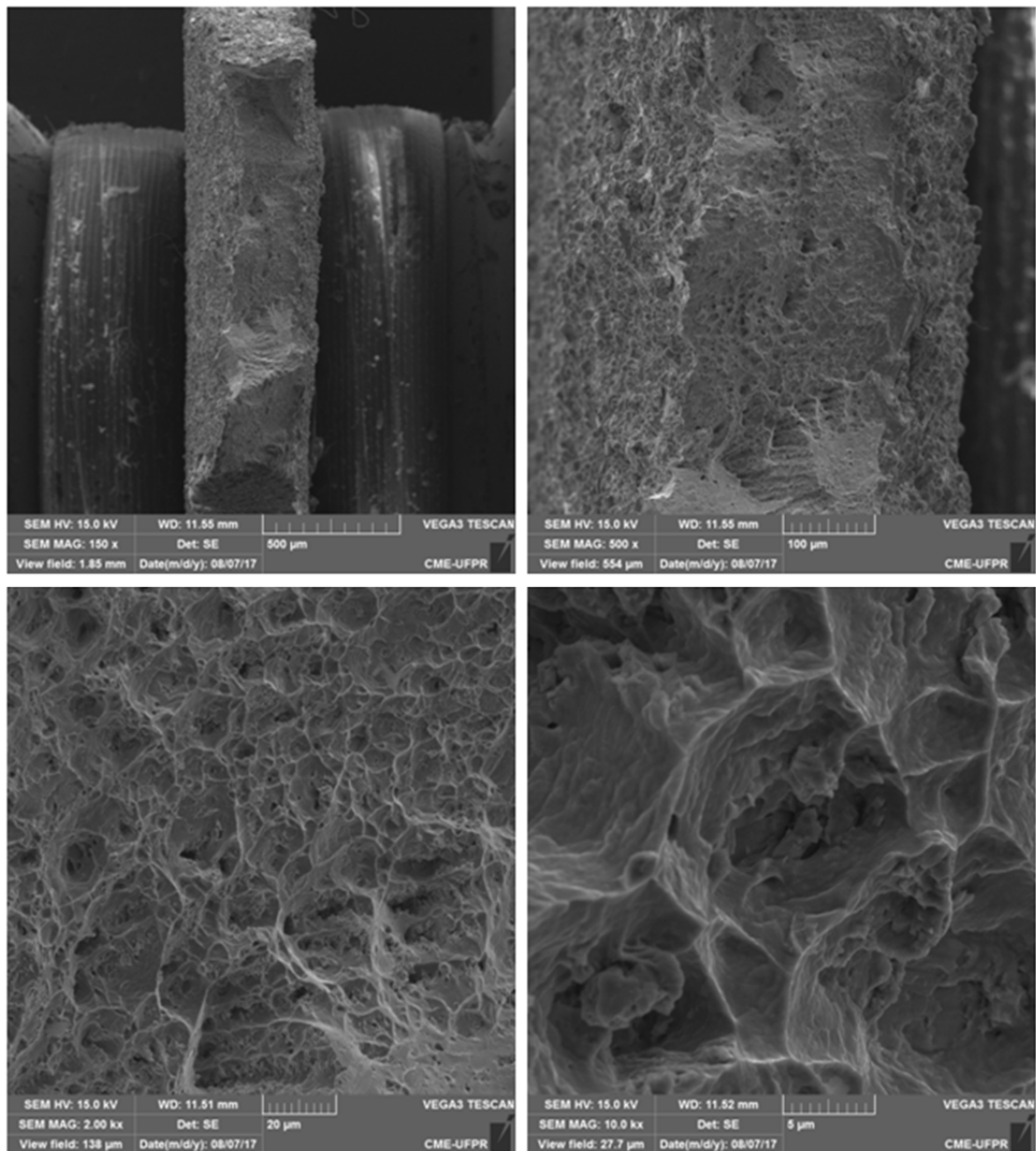
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 43 - SUPERFÍCIE DE FRATURA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 2



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 44 - SUPERFÍCIE DE FRATURA TÍPICA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO, CAMADA 3



FONTE: O autor (2017)

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados apresentados neste trabalho.

6.1 EFEITO DA DEPOSIÇÃO DE MÚLTIPLAS CAMADAS SOBRE A COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS

A análise química dos revestimentos revelou o efeito na deposição de camada sobre camada sobre a introdução de elementos oriundos do substrato original a ser revestido (AISI 1020). Enquanto a primeira camada apresentou diluição elevada de 28%, na segunda camada a diluição foi significativamente reduzida chegando a 7% e então a 3% para a terceira camada. Este resultado justifica o procedimento de deposição de múltiplas camadas nos casos em que processos convencionais de deposição por soldagem forem utilizados, ou seja, quando uma alta diluição é normalmente obtida e uma baixa diluição é desejada.

Rozmus-Górnikowska et al. (2014) destaca que o principal requisito para revestimentos à base de ligas de níquel é o baixo teor de ferro, devendo estar abaixo dos 5 wt % na região externa do revestimento. Para reduzir o teor de ferro, uma especificação de liga IN625 foi desenvolvida para a produção de revestimentos soldados com ferro menor que 0.5 wt %. Adicionalmente, diferentes processos de fabricação com menor aporte de calor vem sendo selecionados como forma de reduzir a interação com o substrato (diluição).

A abordagem deste trabalho mostrou claramente que, apesar de adotar uma técnica de soldagem (GTAW) que inevitavelmente gera alta diluição, esta é consideravelmente reduzida à medida que uma nova camada é depositada sobre a anterior. É importante destacar que, para a terceira camada de revestimento, o teor recomendado de ferro foi alcançado ($\text{Fe} < 5 \text{ wt}\%$).

A adequada análise do efeito da deposição de múltiplas camadas deve considerar um substrato cuja composição química se altera a cada nova camada depositada. Desta forma, o aço deve ser considerado apenas como substrato para a primeira camada de revestimento e, a partir da segunda camada, o substrato passa a ser a camada anterior depositada. Consequentemente, observa-se uma redução acentuada da diluição ou do teor de ferro oriundo do substrato inicial de aço carbono.

Observou-se claramente neste trabalho que, um maior teor de ferro significa dizer que menor teor de elementos de liga (elementos de liga IN 625: cromo, molibdênio e nióbio) estão presentes na composição química dos revestimentos, TABELA 7 e FIGURA 13. Assim, é bastante óbvia a relação da diluição com os elementos que promovem o endurecimento por efeito de solução sólida na liga Inconel 625.

De forma análoga, é importante ainda destacar que a introdução de carbono oriundo do aço carbono utilizado como substrato (AISI 1020 - 0,21 wt%), faz com que diferentes frações de carbonetos sejam observadas nos revestimentos soldados, uma vez que elementos formadores de carbonetos estão presentes na composição da liga (especialmente molibdênio e nióbio). Considerando que o teor de carbono do substrato é significativamente mais alto que o teor de carbono do arame de soldagem (IN625 - 0,005 wt%), pode-se propor que uma maior fração de carbonetos seja encontrada para maior diluição (ou maior participação do substrato na composição final do revestimento), seguindo a tendência já relatada anteriormente (ANTOSZCZYSZYN et al., 2014). O autor referenciado estudou o efeito da diluição sobre a microestrutura de revestimentos de liga IN625 depositados por PTA sobre substrato de aço AISI 316L e API 5L X70, sendo este último de composição muito similar ao AISI 1020. Em seu trabalho, o autor observou que uma maior diluição sobre aço API 5L X70 (0,17 wt% de C) resulta em maior fração de carbonetos do tipo MC. Contudo, apesar deste trabalho ter realizado a deposição a partir de um processo de fabricação diferente e sobre um substrato também diferente, foi observada uma mesma lógica acerca da natureza das fases bem como da sua fração volumétrica, conforme discutido à seguir.

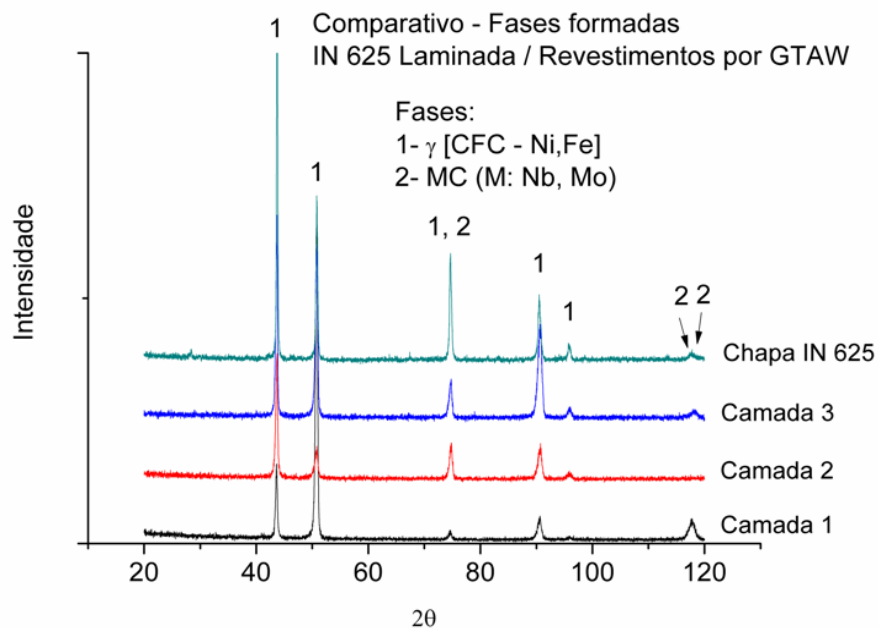
Yeni e Koçak (2005) observaram a formação de fase Laves em uma liga IN625 depositada por laser. Vale destacar que a fase Laves foi formada para uma composição da liga IN625 com apenas 0,01 wt% de carbono. Ram et al. (2004) relatou que carbonetos do tipo MC ou M_6C podem se formar com os elementos molibdênio e nióbio. Assim, considerando a diluição e o teor de carbono de 0,005 wt% do arame é razoável afirmar que, neste trabalho, as partículas de segunda fase são carbonetos decorrentes da diluição.

6.2 EFEITO DA DEPOSIÇÃO DE MÚLTIPLAS CAMADAS SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS

Partindo da análise realizada em termos de composição química, é interessante estabelecer agora um paralelo entre a microestrutura e as propriedades mecânicas dos revestimentos. É importante destacar inicialmente que, apesar das diferenças verificadas na composição química, as fases presentes nas diversas condições estudadas são as mesmas (FIGURA 45).

Apesar dos resultados obtidos para a natureza das fases presentes, observou-se uma diferença clara entre a microestrutura dos revestimentos e a microestrutura da liga IN625 no estado como laminado. Por um lado, os revestimentos apresentaram uma microestrutura dendrítica de Ni-CFC e regiões interdendríticas com maior concentração de molibdênio e nióbio, contendo ainda carbonetos, seguindo relatos anteriores (ANTOSZCZYSZYN et al., 2014). Por outro lado, verificou-se que a microestrutura da chapa laminada é composta por grãos equiaxiais recristalizados com maclas de deformação e pequenas partículas distribuídas em contorno de grão.

FIGURA 45 - DIFRATOGRAMAS COMPARATIVOS PARA AS DIVERSAS CONDIÇÕES ANALISADAS

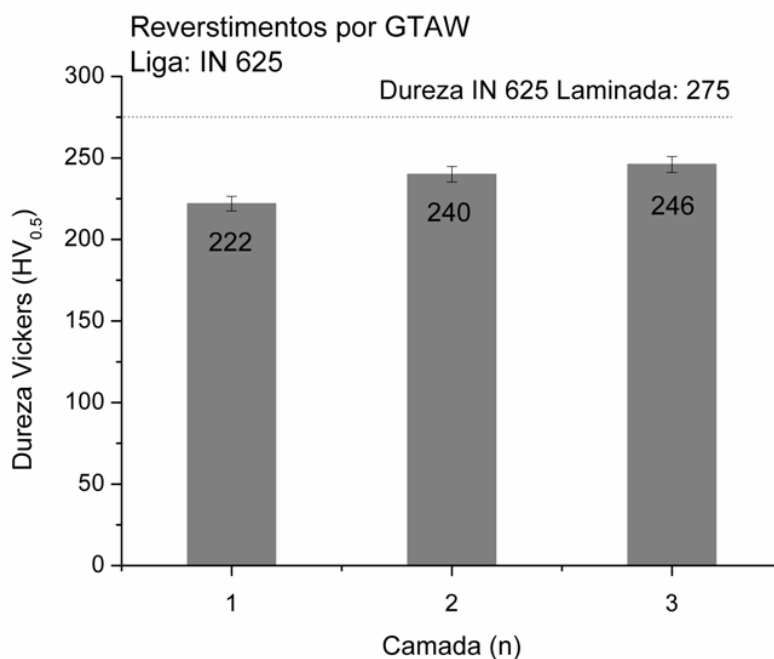


FONTE: O autor (2017)

Considerando que a caracterização metalúrgica indicou diferenças de composição química e microestruturais para a liga IN625, a dureza foi também afetada. Levando-se em consideração os revestimentos, uma menor dureza foi observada para maior diluição (Camada 1), como consequência do menor teor de elementos endurecedores por solução sólida, apesar da maior fração de carbonetos observada. Isto indica que, para os revestimentos, o fator mais significativo e relacionado à diluição é o de endurecimento por soluções sólidas.

De forma complementar, quando comparam-se os revestimentos com a condição laminada, observa-se uma estrutura de solidificação grosseira nos primeiros em comparação à uma estrutura de grãos equiaxiais refinados na condição laminada, realçando também outro fator que deve influenciar a dureza final da liga. Observou-se, neste trabalho, que a dureza da liga na condição laminada é maior que a dos revestimentos soldados. Neste caso, apontam-se dois efeitos responsáveis: soluções sólidas e refinamento da microestrutura. Finalmente, vale destacar que, uma vez que a composição química é muito similar para a chapa em comparação à terceira camada de revestimento (Camada 3), a diferença de dureza em particular está relacionada às diferenças microestruturais (FIGURA 46).

FIGURA 46 - COMPARATIVA DE DUREZA DOS REVESTIMENTOS E DA CHAPA LAMINADA



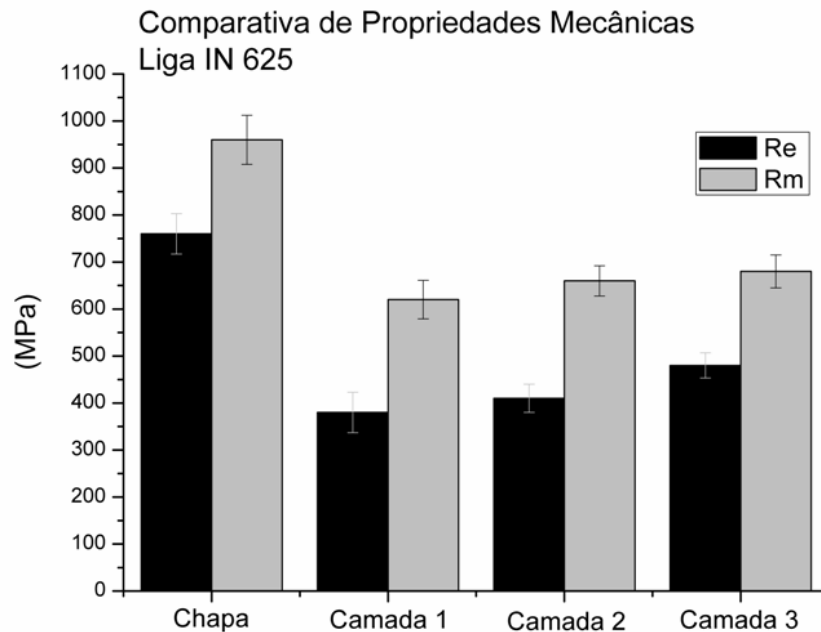
FONTE: O autor (2017)

Yeni e Koçak (2005) relatam uma dureza para os revestimentos de liga IN625 obtidos por deposição a laser entre 210 e 230 HV. Neste trabalho, o valor da dureza dos revestimentos de camada única (Camada 1) foi de 222 HV_{0,5}, mostrando valores muito similares ao relatados pela literatura. Da mesma forma, a diferença encontrada entre os revestimentos e a condição laminada seguiu as tendências anteriormente apontadas por outros autores.

Uma análise da dureza para as três camadas de revestimento que apresentaram uma microestrutura similar é também adequada e indica diferenças relacionadas ao efeito de solução sólida e fração de carbonetos. De fato, observou-se um aumento na dureza dos revestimentos à medida que a diluição diminui, sendo o efeito de endurecimento por soluções sólidas o fator mais significativo em relação ao efeito de endurecimento dos carbonetos formados (segunda fase), seguindo resultados de trabalhos anteriores realizados acerca de revestimentos soldados com a liga estudada apresentados (ANTOSZCZYSZYN, 2014; FERREIRA; GRAF; SCHEID, 2015).

Considerando os mecanismos de endurecimento presentes nas condições avaliadas, fica interessante a análise comparativa das propriedades mecânicas em tração, FIGURA 47. O processamento da liga IN625 na forma de revestimentos promoveu uma notável redução do limite de escoamento e de resistência à tração, comparativamente à condição laminada.

FIGURA 47 - COMPARATIVA DAS MÉDIAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS EM TRAÇÃO: LIMITE DE ESCOAMENTO (Re), LIMITE DE RESISTENCIA A TRAÇÃO (Rm)

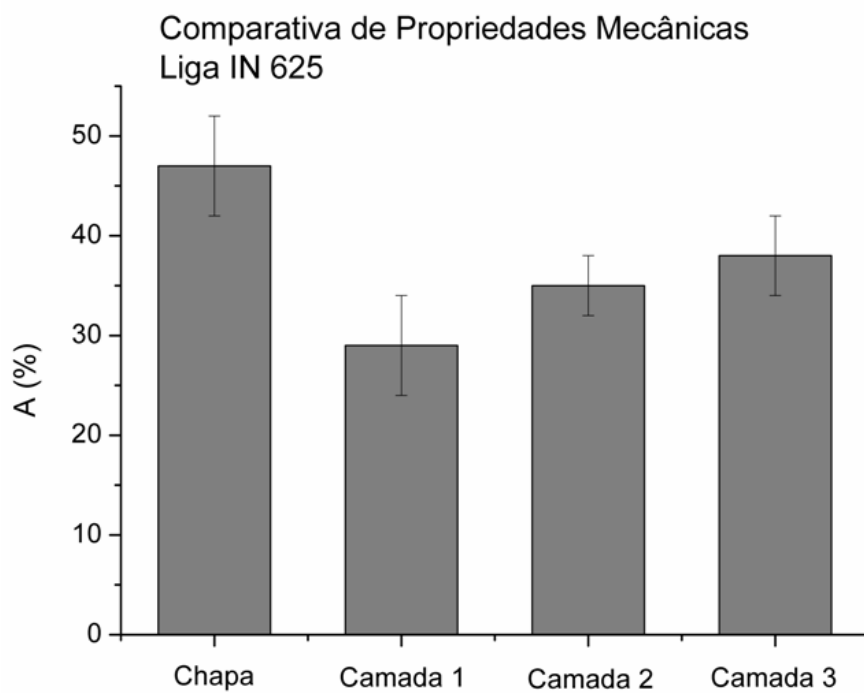


FONTE: O autor (2017)

Partindo de uma condição inicial comparativa entre a liga laminada e a terceira camada de revestimentos em que a composição química é muito similar e próxima à composição nominal da liga IN625, observou-se claramente o efeito das diferenças microestruturais da liga estudada. Neste caso, o efeito de endurecimento por soluções sólidas é muito próximo, apesar da caracterização anterior mostrar regiões com partição de elementos interdendríticamente para os revestimentos. Assim, a notável resistência superior da chapa laminada está relacionada ao refinamento da microestrutura e homogeneidade da distribuição dos elementos de liga, além de conter maclas de deformação.

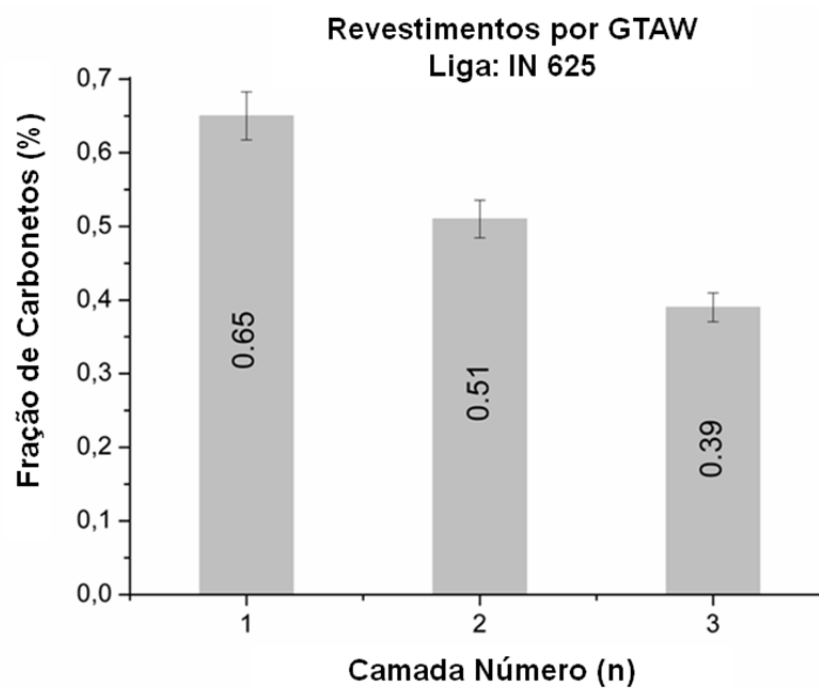
Contudo, resta ainda analisar o efeito da diluição sobre as características dos revestimentos (com microestrutura similar). Observou-se que a maior diluição levou a uma pequena redução do limite de escoamento e limite de resistência. A diferença observada na ductilidade (FIGURA 48) está diretamente associada ao livre caminho médio das discordâncias, que é reduzido pela formação de uma maior fração de carbonetos (FIGURA 49), enquanto os dois primeiros estão relacionados à composição química (elementos de liga em solução sólida).

FIGURA 48 - COMPARATIVA DO ALONGAMENTO EM TRAÇÃO OBTIDA PARA A CHAPA LAMINADA E PARA OS REVESTIMENTOS DAS CAMADAS 1, 2 E 3



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 49 - FRAÇÃO DE CARBONETOS TIPO MC ENCONTRADO NOS REVESTIMENTOS PARA AS CAMADAS 1, 2 E 3



FONTE: O autor (2017)

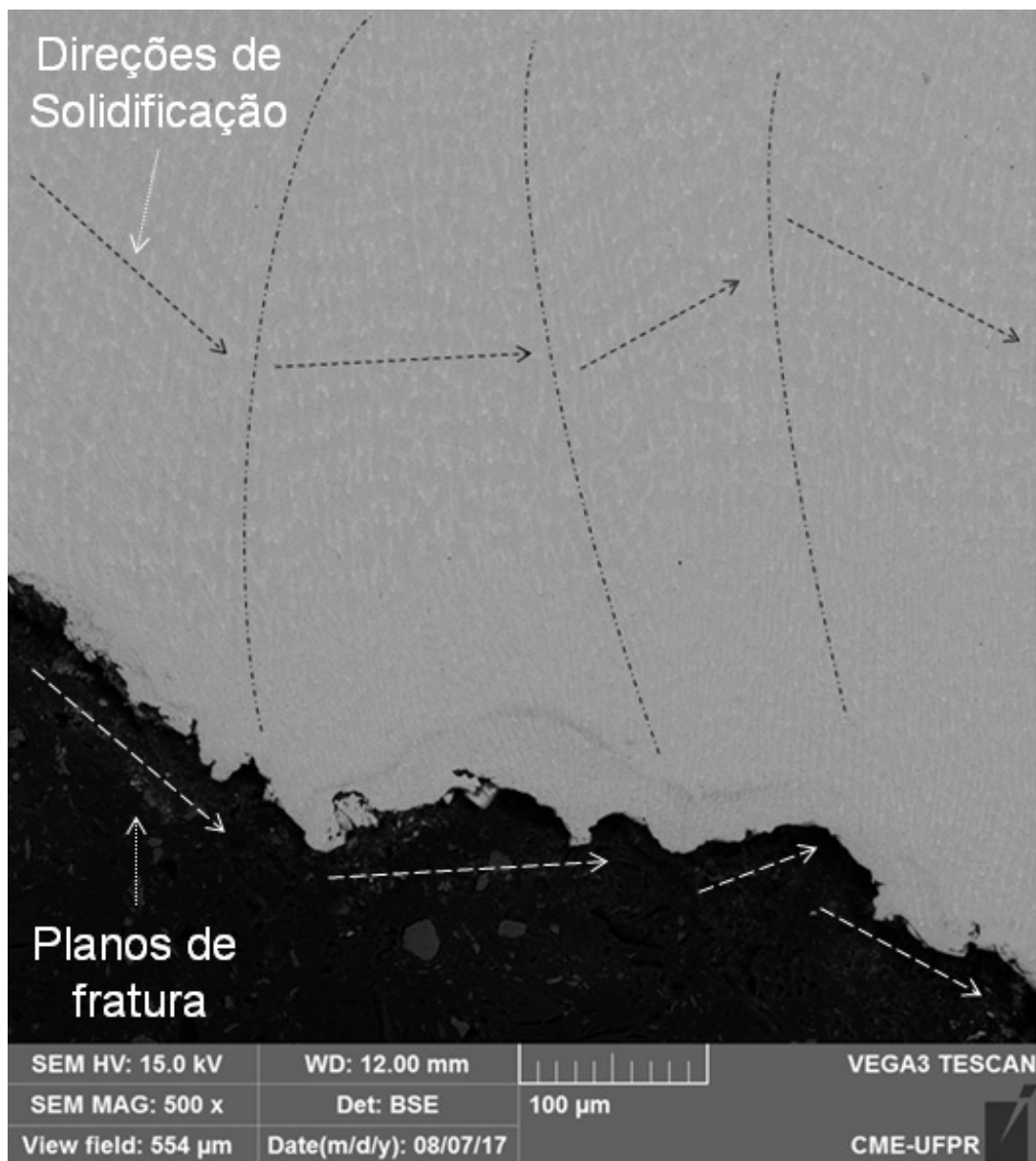
A análise adicional por macrografia realizada nos corpos de prova de microtração após os ensaios, apresentada nas FIGURAS 42 a 44, possibilitou observar claramente as diferenças na ductilidade dos revestimentos. A maior ductilidade observada para a terceira camada fica claramente visualizada pela maior redução em área (menor largura do corpo de prova na região de fratura), conforme mostra a FIGURA 44. Observou-se adicionalmente pela análise da fratura dos corpos de prova de microtração que, apesar do micromecanismo de fratura ser coalescimento de microcavidades para as três camadas de revestimento, as três condições apresentam diferenças no tamanho das microcavidades. A camada 1 apresenta microcavidades menores, que são gradativamente maiores para as camadas 2 e 3.

Consequentemente, as diferenças podem ser associadas ao processamento, que está influenciando diretamente no processo de nucleação das microcavidades. É razoável propor que os carbonetos interdendríticos atuem como nucleadores das microcavidades e, considerando uma maior fração para a camada 1, o refino das cavidades é consequência deste fator conforme mostra a FIGURA 42. Finalmente, deve ser realçado que, as cavidades maiores, FIGURAS 43 e 44, estão associadas também a uma maior ductilidade dos revestimentos. Yeni e Koçak (2005) relatam que a ductilidade do metal de solda da liga IN625 é reduzida em comparação ao metal de base na forma de chapa, como consequência da presença de partículas duras de fase Laves na região do metal de solda. De forma análoga, é razoável propor neste trabalho que os carbonetos estejam influenciando diretamente no processo de coalescimento das microcavidades, pelo destacamento da interface matriz-partícula ou ainda pela fratura das partículas de elevada dureza, dependendo do seu tamanho e distribuição.

A FIGURA 50 apresenta o detalhe da região de fratura para os corpos de prova da camada 1. É importante notar que existe uma relação entre a direção de fratura e a orientação da estrutura dendrítica de solidificação. Deve-se recordar que a microestrutura dos revestimentos é composta por dendritas de níquel (CFC) e regiões interdendríticas enriquecidas em molibdênio e nióbio, contendo carbonetos destes elementos. As setas indicam a direção de crescimento dendrítico, ficando claro que estas regiões (dendritas) apresentam maior plasticidade decorrente do menor teor de Mo e Nb e estão ainda livres de carbonetos. Portanto, observou-se

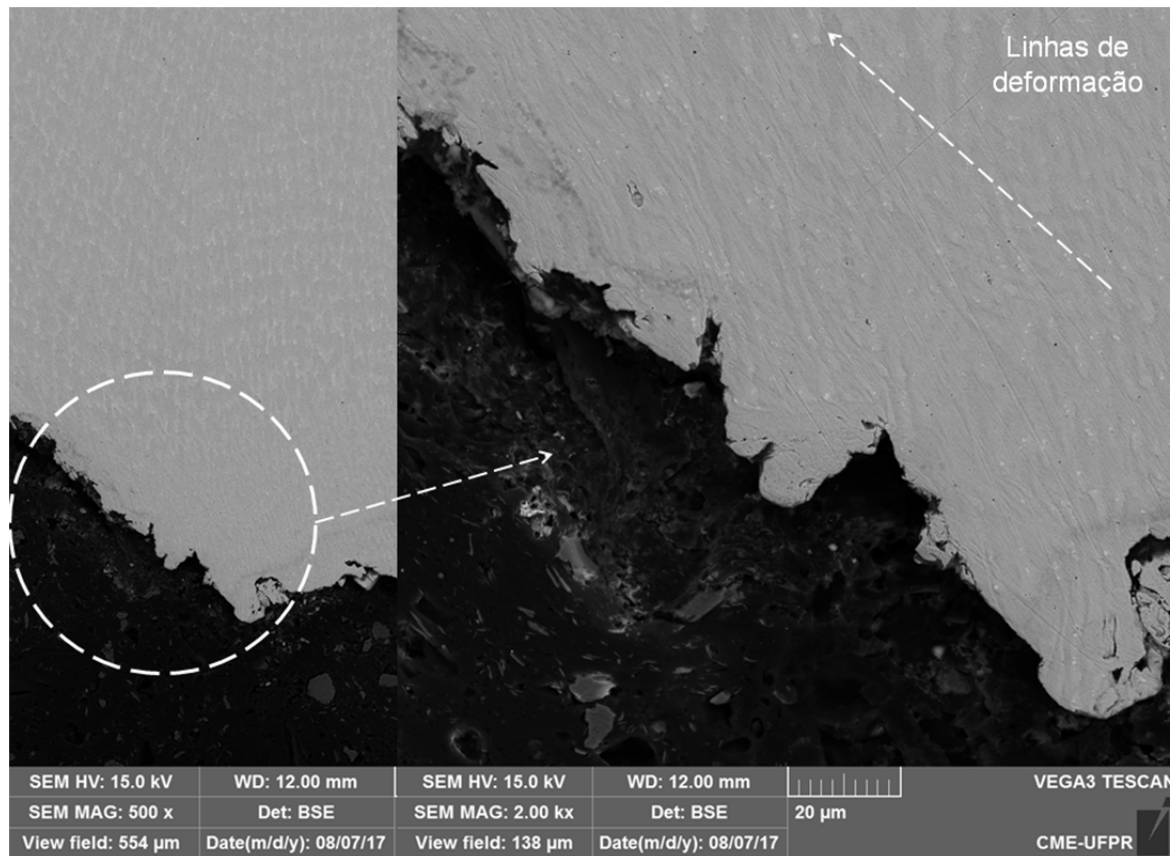
que a fratura dos corpos de prova de tração ocorre preferencialmente ao longo das dendritas de Ni-CFC e sendo, portanto, dependente da direção de solidificação. A FIGURA 51, pertencente aos corpos de prova da Camada 1, mostra em detalhe a região de maior deformação plástica, próximo à fratura, apresentando linhas de deformação visíveis na direção de crescimento dendritico de solidificação.

FIGURA 50 - CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO PARA A CAMADA 1 ACOMPANHANDO AS DIREÇÕES DE SOLIDIFICAÇÃO



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 51 - CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA DE MICROTRAÇÃO PARA A CAMADA 1 MOSTRANDO LINHAS DE DEFORMAÇÃO



FONTE: O autor (2017)

7 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o efeito da deposição de múltiplas camadas de revestimento sobre a composição química, diluição, microestrutura e propriedades mecânicas de revestimentos de liga IN625 depositados por GTAW sobre substrato de aço carbono AISI 1020. As principais contribuições são apresentadas à seguir:

A diluição ao substrato de aço é reduzida significativamente à medida que uma nova camada de revestimento é depositada sobre a anterior. Isto se deve ao fato de que o substrato para a deposição da segunda camada é a primeira depositada e que apresenta menor teor de ferro que o aço base. Adicionalmente, o substrato para a terceira camada é a segunda (com ainda menor teor de ferro), justificando a expressiva redução da diluição observada.

A avaliação da metalúrgica dos revestimentos mostrou que microestrutura dos revestimentos não se altera pela deposição de múltiplas camadas, permanecendo na forma de dendritas de Ni-CFC com regiões interdendríticas enriquecidas em molibdênio e nióbio contendo ainda carbonetos do tipo MC. Consequentemente, a natureza das fases presentes nos revestimentos não é alterada, apesar da fração volumétrica de carbonetos ter acompanhado de forma direta a diluição ao substrato.

A análise comparativa da microestrutura indicou que os revestimentos por soldagem apresentam estrutura de solidificação com microsegregações e carbonetos precipitados, e por outro lado, o processamento termomecânico da chapa levou a grãos equiaxiais refinados, contendo ainda maclas de deformação e pequenos precipitados (carbonetos tipo MC).

A dureza deu uma indicação do efeito dos diversos mecanismos de endurecimento atuantes para as condições de processamento estudadas neste trabalho. A partir da dureza, as diferenças importantes associadas à composição química foram mapeadas para os revestimentos. Adicionalmente, a determinante diferença para a condição laminada foi também destacada. Apesar disso, a resistência mecânica precisa ser investigada, especialmente quando processos de deformação plástica estão envolvidos.

A deposição sobre substrato de aço carbono SAE/AISI 1020 permitiu concluir que os dois principais elementos que afetam as propriedades dos revestimentos foram ferro e carbono. O ferro influenciou diretamente o limite de

escoamento e resistência à tração por meio das soluções sólidas, enquanto o carbono afeta a ductilidade, principalmente porque altera a fração de carbonetos interdendríticos e, conseqüentemente, o livre caminho médio de discordâncias.

A abordagem comparativa dos revestimentos com a mesma liga no estado laminado permitiu mostrar a importância da microestrutura sobre as propriedades mecânicas em tração. Mesmo considerando a terceira camada, em que a composição química é muito semelhante à da chapa, um maior limite de escoamento e de resistência à tração foi verificado para esta última, com manutenção de um excelente alongamento (ductilidade). Portanto, foi possível relacionar estas mudanças nas propriedades diretamente às diferenças microestruturais observadas.

A importância da microestrutura sobre a resistência mecânica da liga IN625 foi mapeada e, apesar da diluição alterar tanto a resistência quanto ductilidade, o efeito benéfico do processamento termomecânico foi claramente evidenciado. Assim, uma excelente resistência mecânica e ductilidade para a liga IN625 é obtida não simplesmente pelo controle da composição química, como também da microestrutura formada.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os avanços obtidos a partir da realização deste trabalho de mestrado e das importantes informações a respeito do efeito do processamento sobre a microestrutura e propriedades dos revestimentos de liga de níquel IN625 depositada por GTAW na forma de múltiplas camadas sobre aço AISI 1020, indicam-se algumas sugestões futuras, conforme segue:

Medidas do teor de ferro médio dos revestimentos indicaram uma queda da diluição à medida que uma nova camada é depositada. Sugere-se a avaliação do efeito do teor de ferro sobre a resistência à corrosão destes revestimentos a partir do levantamento das curvas de voltametria cíclica.

Os revestimentos de liga IN625 poderão ser avaliados quanto à sua estabilidade em elevada temperatura, visando aplicações industriais específicas.

Os revestimentos estudados poderão ser avaliados quanto a processos de falha relacionados à operação de unidades de produção de petróleo. Nestes casos, algumas vezes os componentes estão sujeitos a corrosão sob-tensão, corrosão-fadiga, entre outros.

É importante avaliar a usinabilidade destes revestimentos, já que é provável que estes devam ser usinados antes do uso. Assim, estudos poderão ser realizados para avaliar os esforços de usinagem e acabamento dos revestimentos por GTAW.

REFERÊNCIAS

- ABIOYE, T.E.; FARAYIBI, P.K.; MCCARTNEY, D.G.; CLARE, A.T. Effect of carbide dissolution on the corrosion performance of tungsten carbide reinforced Inconel 625 wire laser coating. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 231, p. 89-99, 2016.
- ABIOYE, T.E.; MCCARTNEY, D.G.; CLARE, A.T. Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 217, p. 232-240, 2015.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 5L**: Specification for Line Pipe, 2012.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 5LD**. Specification for CRA Clad or Lined Steel Pipe, 2005.
- ANTOSZCZYSZYN, T. J. **Revestimentos de liga de níquel Inconel 625 por plasma com arco transferido (PTA) sobre aços API 5L X70 e AISI 316L**. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- ANTOSZCZYSZYN, T.J.; PAES, R.M.G.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M.; SCHEID, A. Impact of Dilution on the Microstructure and Properties of Ni-Based 625 Alloy Coatings. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, 2, p. 134-144, 2014.
- ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, v. 2, p. 1362-1370. Ohio (USA): ASM International, 1992.
- BP GROUP ENGINEERING TECHNICAL PRACTICES. **GIS 18-013**: Guidance on Industry Standard for Integral Cladding, Weld Overlay, and Limited Loose Lining of Pressure Vessels and Components. ago. 2006.
- BP GROUP ENGINEERING TECHNICAL PRACTICES. **GP 43-36**: Guidance on Practice for Pipeline Protection. nov. 2005.
- ÇAM, G.; ERİM, S.; YENİ, Ç.; KOÇAK, M. Determination of Mechanical and Fracture Properties of Laser Beam Welded Steel Joint. **Welding Journal**, American Welding Society, Welding Research Council, v. 78, p. 193s-201s, 1999.
- FERNANDES, F. et al. Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron. **Surface & Coatings Technology**, v. 205, p. 4094-4106, 2011.
- FERREIRA, L. S.; GRAF, K.; SCHEID, A. Microstructure and Properties of Nickel-based C276 Alloy Coatings by PTA on AISI 316L and API 5L X70 Steel Substrates. **Materials Research**, v. 18, p. 212-221, 2015.

GHOLIPOUR, A.; SHAMANIAN, M.; ASHRAFIZADEH, F. Microstructure and wear behavior of stellite 6 cladding on 17-4 PH stainless steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 509-14, p. 4905-4909, 2011.

KEJELIN, N. Z.; BUSHINELLI, A. J. A.; BOHÓRQUEZ, C. H. N. **Soldagem Dissimilar do aço X-60 com INCONEL 625**. Disponível em: http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/soldagem_dissimilar.pdf. Acesso em: 10 out 2013.

KIM, J. S.; PARK, Y. L.; LEE, H. W. Effects of Heat Input on the Pitting Resistance of Inconel 625 Welds by Overlay Welding. **Metals and Materials International**, v. 21, n. 2, p. 350, 2015.

KIM, J. S.; SUH, J. H.; KIM, H. P. Aspects of a Co-free hardfacing Materials Development to Reduce the Radioactivity in NPPs. **Transactions of the Korean Nuclear Society**, Spring Meeting. Jeju (KO), 2007.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. New Jersey (USA): John Wiley & Sons, Inc, 2002.

LASER CLADDING TECHNOLOGY. Disponível em: <http://www.lasercladding.co.uk/Spherotene.aspx>. Acesso em: 11 out. 2016.

LI, G.; ZHANG, M.; HUANG, J.; SUN, Z.; WU, Y. A Comparative study in microstructure and properties of Inconel 52M overlays deposited by laser beam and GTA cladding. **Int J Adv Manuf Technol**. Springer-Verlag, London (EN), 2015.

MELLOR, B.G. **Surface coatings for protection against wear**. Cambridge (EN): Woodhead Publishing Limited, 2006.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte, 2000.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: <http://www.more.ufsc.br/>. Acesso em: 09 out. 2016.

RAM, G. D. J.; REDDY, A. V.; RAO, K. P.; REDDY, G. M. Control of laves phase in Inconel 718 GTA welds with current pulsing. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 9, p. 390–398, 2004.

ROZMUS-GÓRNIKOWSKA, M.; CIENIEK, L.; BLICHARSKI, M.; KUSINSKI., J. Microstructure and microsegregation of an Inconel 625 weld overlay produced on steel pipes by the cold metal transfer technique. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 593, p. 1081–1084, 2014.

SILVA, C. C.; AFONSO, C. R. M.; RAMIREZ, A. J.; MOTTA, M. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J.P. **Aspectos Metalúrgicos de Revestimentos Dissimilares com Superliga à Base de Níquel Inconel 625**. São Paulo, 2012.

SONG, K. H.; NAKATA, K. Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded Inconel 625 Alloy. **Materials Transactions**, v. 50, n. 10, p. 2498-2501, 2009.

SPECIAL METALS. **Joinings**, disponível em:

<<http://www.specialmetals.com/assets/documents/smw/joining.pdf>>. Acesso em ago. 2016.

SPECIAL METALS. **Technical bulletin INCONEL® alloy 625**, disponível em:

<<http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

STANDARD NORWAY. **NORSOK Standard M-001**. Materials Selection. set. 2014.

TRIENG TECNICA INDUSTRIAL. Reunião técnica sobre revestimento. Araucária, 2016.

VENKATESHA, B.; SRIKERA, K.; PRABHAKAR, VSV. Wear Characteristics of Hardfacing Alloys: State-of-the-art. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOMATERIALS AND TECHNOLOGIES, 2., 2015. **Procedia Materials Science**, v. 10, p. 527-532, 2015.

VERDI, D.; GARRIDO, M.A.; MUNIZ, C.J.; POZA, P. Mechanical Properties of Inconel 625 Laser Cladded Coatings: Depth Sensing Indentation Analysis. **Materials Science and Engineering: A**, v. 598, p. 15-21, 2014.

YENI, C.; KOÇAK, M. Fracture toughness analysis of laser-beam-welded superalloys Inconel 718 and 625. **Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures**, v. 29, p. 546-557, 2005.

ZUMPARO JR. P.; GARMIS, A. G.; OAZEN, E. V.; LEITE, L. G. T. S.; SILVA, R. N. Integrity of Weld Overlay of Flexible Joints and Lined Pipe. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 34. **Proceedings of ASME 2015**, v. 5b, OMAE2015-42193. Newfoundland (CA), 2015.